

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

**Optimalizace signálního plánu světelně
řízené křižovatky v simulačním programu
Witness**

**Optimization of Signalised Intersection
Control Plan Using Simulation Software
Witness**

Student:

Bc. Ondřej Vícha

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Michal Dorda, Ph.D.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Vícha**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T003 Dopravní technika a technologie
Specializace: 20 Silniční doprava
Téma: **Optimalizace signálního plánu světelně řízené křižovatky v simulačním programu Witness**
Optimization of Signalised Intersection Control Plan Using Simulation Software Witness
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cíl práce: Cílem práce je vytvořit simulační model světelně řízené křižovatky a s využitím optimalizačních nástrojů software Witness sestavit signální plán pro tuto křižovatku. V rámci experimentů bude kvalita získaných řešení porovnávána s výsledky získanými řešením matematického modelu.

Osnova práce:

1. Úvod.
2. Teoretická východiska pro řešení práce.
3. Analýza vstupních údajů.
4. Simulační model.
5. Matematický model.
6. Provedené experimenty a jejich vyhodnocení.
7. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

MEDELSKÁ, Viera. *Dopravné inžinierstvo*. Bratislava: Alfa, 1991. ISBN 80-05-00737-X.
Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení provozu na pozemních komunikacích: technické podmínky : TP 81. 2. vyd. Praha: Ministerstvo dopravy, 2006. ISBN 80-86502-30-9.
MARTOLOS, Jan. *Posuzování kapacity světelně řízených křižovatek*. Liberec: EDIP, 2011. ISBN 978-80-87394-03-8.
Manuály k simulačnímu software Witness.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Michal Dorda, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. května 2019.

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі́, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomovou práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019.

.....

Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Ondřej Vícha

Adresa trvalého pobytu autora práce: Vančurova 717/79, 74601, Opava

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VÍCHA, O. *Optimalizace signálního plánu světelně řízené křižovatky v simulačním programu Witness: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2019, 72 s. Vedoucí práce: Dorda, M.

Diplomová práce se zabývá testováním algoritmů při řešení optimalizace signálního plánu světelně řízené křižovatky, kterými disponuje optimalizační nástroj Optimizer softwaru Witness. Úvodní kapitola charakterizuje teoretické pojmy týkající se dané problematiky. Následující část je věnována popisu vstupních údajů. Ve třetí kapitole je popsána konstrukce matematického modelu. Další kapitola je zaměřena na tvorbu simulačního modelu. Praktickou částí se zabývá pátá kapitola, jsou zde popsány a provedeny experimenty a jejich vyhodnocení.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

VÍCHA, O. *Optimization of Signalised Intersection Control Plan Using Simulation Software Witness: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of mechanical Engineering, Institute of Transport, 2019, 72 p. Thesis Head: Dorda, M.

The master's thesis deals with testing of algorithms to determine an optimal signalized intersection control plan using a simulation software Witness. The introductory chapter focuses on theoretical terms concerning the topic. The following part is dedicated to the description of entry data. The composition of mathematical model is described in the third chapter and the simulation model in the subsequent one. The fifth chapter discusses conducted experiments and their evaluation.

Obsah

Seznam Použitých značek a symbolů.....	8
1 Úvod.....	10
2 Teoretická východiska pro řešení práce	11
3 Analýza vstupních údajů	17
4 Matematický model.....	20
4.1 Dekompoziční přístup.....	20
4.2 Kapacitní posouzení.....	31
5 Simulační model.....	37
5.1 Tvorba modelu.....	37
5.1.1 Součást (Part).....	37
5.1.2 Zásobník (Buffer)	38
5.1.3 Stroj (Machine).....	39
5.1.4 Vstupní a výstupní pravidla.....	41
5.1.5 Vstupní a výstupní údaje	42
5.1.6 Zahajovací akce (Initialize actions).....	44
5.2 Porovnání výsledných hodnot středních dob zdržení a délek front zjištěných pomocí TP – 235 a simulačního modelu	49
6 Provedené experimenty a jejich vyhodnocení.....	52
6.1 Algoritmy.....	53
6.2 Experimenty.....	55
6.2.1 Adaptive Thermostatistical Simulated Annealing (SA).....	56
6.2.2 Random Solutions	60
6.2.3 Hill Climb.....	63
6.2.4 Min/Mid/Max	67
6.2.5 Kombinace algoritmů	70
6.3 Srovnání použitých algoritmů.....	74
6.4 Dodatek práce	76
7 Závěr	80
Seznam použité literatury.....	83
Seznam příloh.....	85

Seznam Použitých značek a symbolů

a	Podélný sklon vjezdu [%]
c	Délka cyklu [s]
C_v	Kapacita vjezdu [p.v./h]
f	Podíl odbočujících vozidel z celkové intenzity vjezdu [-]
i	Počet dopravních proudů
I_v	Intenzita vjezdu [p.v./h]
k	Počet řadících pruhů tvořící jeden vjezd
k_{obl}	Koeficient oblouku [-]
k_{skl}	Koeficient sklonu [-]
L_f	Délka fronty [m]
L_n	Najíždějící dráha [m]
L_v	Vyklizovací dráha [m]
l_{voz}	Délka vyklizujícího vozidla [m]
n	Počet fází
n_p	Počet řadících pruhů tvořících jeden vjezd
q	Intenzita vozidel v matematickém modelu [p.v./h]
R	Poloměr směrového oblouku při odbočování [m]
Rez	Rezerva kapacity vjezdu [-]
S_i	Saturovaný tok řadícího pruhu [p.v./h]
SSZ	Světelné signalizační zařízení
S_v	Saturovaný tok vjezdu [p.v./h]
$S_{zákl}$	Základní saturovaný tok [p.v./h]
τ	Doba potřebná pro vjezd vozidla do křižovatky [s]
t_b	Bezpečnostní doba [s]

t_c	Reálná délka cyklu [s]
t_m	Mezičas [s]
$t_{m,r}$	Rozhodující mezičas [s]
$t_{m,x}$	Součtový mezičas [s]
t_{min}	Minimální délka zelené [s]
TP	Technické podmínky
t_w	Střední doba zdržení [s]
u	Minimální poměrná rezerva
v_n	Rychlost najíždějícího vozidla [m/s]
v_v	Rychlost vyklizujícího vozidla [m/s]
x_i	Začátky zelených [s]
y_i	Konce zelených [s]
z	Délka zelené [s]
z'	Efektivní délka zelené [s]

1 Úvod

Důsledkem současné éry moderních technologií a globální elektronizace všech systémů společnosti je akcelerace života jedince. Spěch, zhýčkanost a pohodlí člověka mu velí za každou cenu usednout na přední sedadlo na místo řidiče. Stěžejním problémem dopravních situací ve městech je plynulost provozu, a právě křižovatky jsou jejich pulzujícími srdci. Prevencí srdečního selhání u lidí je vyvážená strava a zdravý životní styl, řešením nastalého kolapsu může být bypass. Nelze-li dopravní situaci ve městech vyřešit obchvatem, je nezbytné provést výběr nejlepší varianty signálního plánu světelně řízených křižovatek. Jeho korektní optimalizace je preventivním opatřením předcházející kongescím.

Diplomová práce je zaměřena na testování algoritmů, jež jsou využívány k optimalizaci. Snahou je nalézt jejich charakteristiky a reakce na zadaný problém, jímž je pro tuto práci plynulost provozu danou křižovatkou.

2 Teoretická východiska pro řešení práce

Cílem práce je za pomoci optimalizačních nástrojů programu Witness sestavit signální plán světelně řízené křižovatky, což vede k otestování algoritmů, kterými tento software disponuje. Předmětem této kapitoly je tedy popis základních pojmů týkajících se uvedené problematiky. Kvůli přehlednosti a lepšímu porozumění zde nejsou definovány pojmy související přímo se samotným kapacitním posouzením (ty jsou popsány až v kapitole matematický model) a samotný popis programu (je uveden v kapitole Simulační model a Provedené experimenty a jejich vyhodnocení).

Pozemní komunikace

Pozemní komunikace je liniovou stavbou, určenou převážně pro dopravu silničních dopravních prostředků (v některých případech i kolejových dopravních prostředků), avšak mohou se po ní pohybovat také chodci případně cyklisté. Lze je rozdělit na pozemní komunikace v intravilánu, které leží v zastavěné oblasti, z tohoto důvodu jsou nazývané městské či místní, a pozemní komunikace v extravilánu nacházející se mimo zastavěnou oblast. [1]

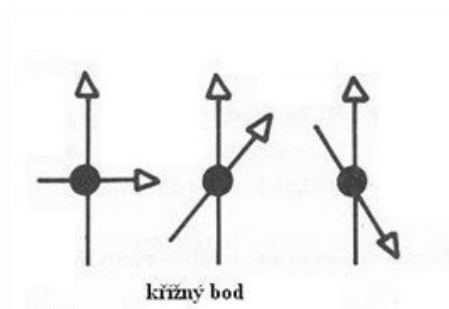
Křižovatka

Jestliže při vedení pozemních komunikací dochází v půdorysném průřezu k jejich protínání nebo stýkání, a zároveň alespoň dvě z těchto komunikací se propojují, vzniká místo, které se nazývá křižovatka. Za křižovatku není považováno místo připojení účelových komunikací (lesní nebo polní cesty či sjezdy k nemovitostem) k ostatním pozemním komunikacím. [1]

Kolizní plochy

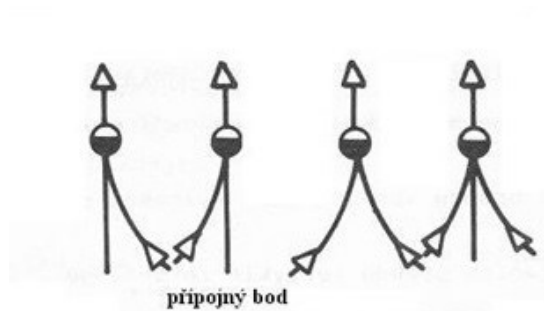
Ve všech křižovatkách ať už úrovnových, mimoúrovňových nebo kombinovaných, vznikají kolizní plochy. Jedná se o místa, ve kterých dochází ke křižování pohybů vozidel. Pro zjednodušení výpočtů jsou nahrazovány za kolizní body. Lze je rozdělit do čtyřech kategorií. [1]

- Křižné



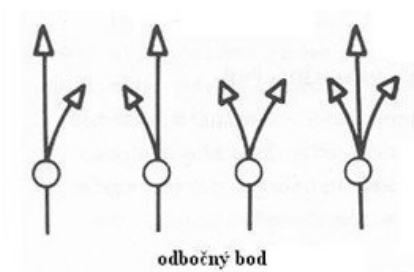
Obrázek 1 - Křižný kolizní bod [2]

- Přípojné



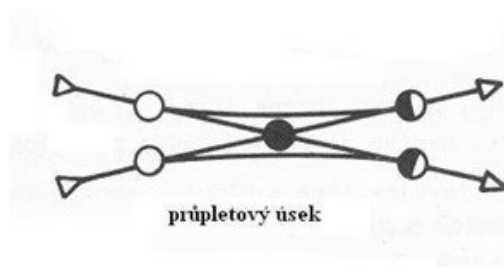
Obrázek 2 - Přípojný kolizní bod [2]

- Odbočné



Obrázek 3 - Odbočný kolizní bod [2]

- Průpletové



Obrázek 4 - Průpletový kolizní bod [2]

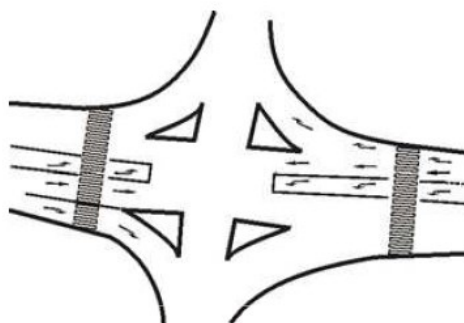
Základní rozdělení křižovatek

Na křižovatky lze podle stanovených kritérií pohlížet z více úhlů pohledu, které se mezi sebou vzájemně doplňují. Křižovatky lze rozdělit podle řízení přednosti v jízdě na:

- Křižovatky neřízené – Přednost jízdy je určena pouze zákonem o provozu na pozemních komunikacích (hlavní a vedlejší směr, přednost zprava atd.) [1]
- Křižovatky řízené – Přednost jízdy je dána pomocí světelných signalizačních zařízení (SSZ). [1]

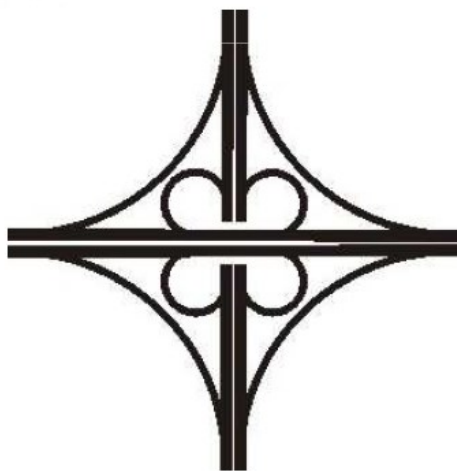
A podle výškových úrovní na:

- Úrovňové křižovatky – Silniční komunikace se protínají v jedné úrovni a nedochází ke křížení, avšak jsou zde křížné kolizní body. [1]



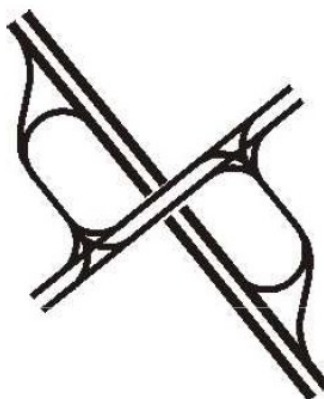
Obrázek 5 - Úrovňová křižovatka [1]

- Mimoúrovňové křižovatky – U těchto typů křižovatek nevznikají křížné kolizní body, existuje zde křížení silničních komunikací. [1]



Obrázek 6 - Mimoúrovňová křižovatka [1]

- Kombinované křižovatky – Vznikají kombinací úrovněvých a mimoúrovňových křižovatek, mohou obsahovat křížné kolizní body [1]

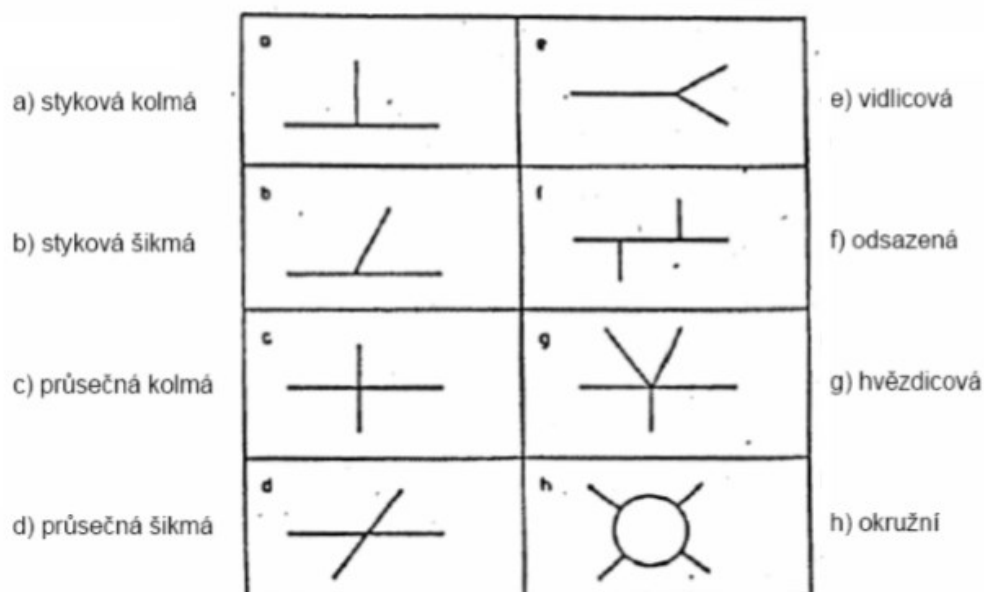


Obrázek 7 - Kombinovaná křižovatka [1]

Úrovněvé křižovatky

S ohledem na typ křižovatky zvolené v praktické části práce, budou dále vysvětleny pouze úrovněvé křižovatky. Podle již výše zmíněné definice dochází k propojení silničních komunikací v jedné úrovni. S ohledem na tvar existuje šest typů úrovněvých křižovatek. [1]

- Stykové – Tříramenná křižovatka ve tvaru T
- Průsečné – Čtyřramenná křižovatka ve tvaru X
- Vidlicové – Tříramenná křižovatka ve tvaru Y
- Odsazené – Dvě stykové křižovatky umístěné v určité vzdálenosti od sebe
- Hvězdicové – Pětiramenná a víceramenná křižovatka
- Okružní – Tříramenná a víceramenná křižovatka se středním ostrovem kruhového tvaru



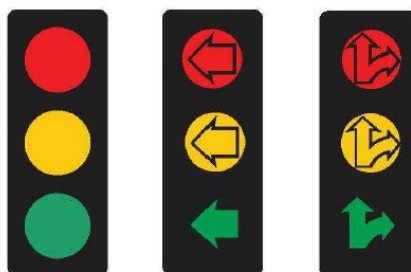
Obrázek 8 - Typy úrovnňových křižovatek s ohledem na jejich tvar [3]

Podle existence optických nebo fyzických směrových ostrůvků (slouží k usměrnění dopravních proudů vozidel), rozlišujeme křižovatky na usměrněné – ostrůvky jsou přítomny – a prosté – bez ostrůvku s výskytem převážně na méně frekventovaných komunikacích. [1]

Světelné signalizační zařízení – SSZ

Jak bylo výše uvedeno, pro řízení křižovatek se využívá SSZ. Jejich funkcí je zajištění bezpečnějšího a plynulejšího provozu na silničních komunikacích při využití světelných signálů. Mezi ty základní určené k řízení vozidlových proudů patří: [1]

- Tříbarevná soustava s plnými signály
- Tříbarevná soustava se směrovými signály
- Tříbarevná soustava s kombinovanými směrovými signály



Obrázek 9 - Světelné signály [1]

Pro zřizování SSZ jsou daná čtyři kritéria, přičemž je dostačující splnění alespoň jednoho z nich (nelze všem požadavkům vyhovět). Mezi kritéria zařazujeme bezpečnost provozu, plynulost jízdy vozidel městské hromadné dopravy, dále je zohledňována intenzita provozu z hlediska vozidel i z hlediska chodců. [1], [4]

Kvůli bezpečnosti jsou na řízených křižovatkách umožněny pouze nekolizní případně, s ohledem na intenzitu dopravy, podmíněně kolizní pohyby vozidel a chodců v jedné fázi. Celkově existují tři možné pohyby – nekolizní, podmíněně kolizní a kolizní. U nekolizních pohybů nedochází v rámci jedné fáze ke střetávání, křižování nebo připojování dopravních proudů. V případě, že se tak stane, vznikají podmíněně kolizní pohyby. Zde pak platí pravidlo o přednosti dle zákona č. 361/2000 Sb. Zákon o silničním provozu, příkladem může být levé odbočení s přímou jízdou protijedoucích vozidel. Kolizní pohyby jsou dále definovány jako všechny ty, jež jsou opakem pohybů nekolizních. [1]

Signální plán

Samotná SSZ jsou řízena signálním plánem určujícím pořadí a délky zelených signálů volno dílčích signálních skupin. Signální plán rozlišujeme na statický (pevný) nebo dynamický. U statického signálního plánu jsou délky zelených signálů pro jednotlivé vjezdy, délka cyklu a sled fází neměnné. U dynamického jsou tyto „parametry“ proměnnými nabývající rozdílných hodnot v závislosti na okamžitých požadavcích dopravy, přičemž pro správnou funkci SSZ je zapotřebí zařízení pro detekci vozidel. [1]

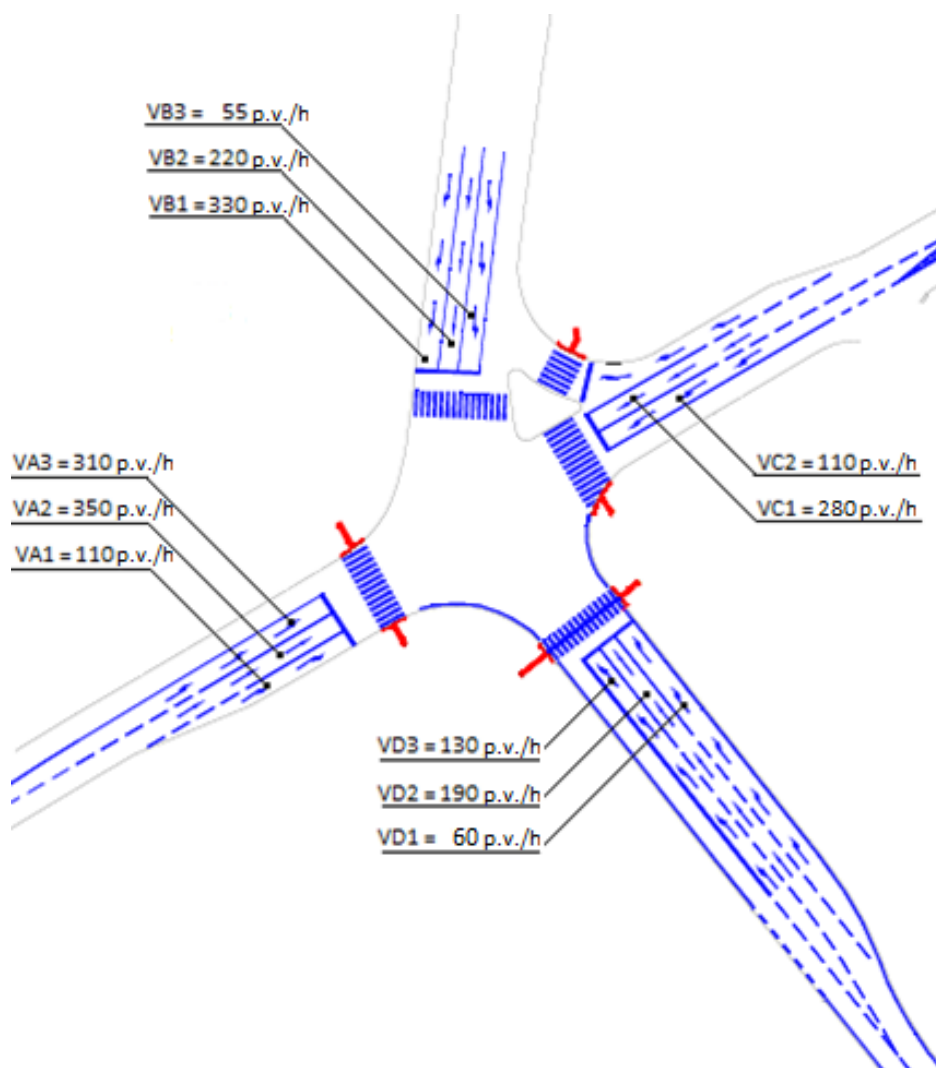
Pro navržení pevného signálního plánu je zapotřebí zajistit vstupní podklady. Náleží k nim dopravní průzkumy (intenzity jednotlivých dopravních proudů a jejich skladby), situační schéma a rozbor nehodovosti dané křižovatky. Poté je možné navrhnout samotný signální plán sestávající se z několika kroků. Předně se provádí výpočet mezičasů pro jednotlivé kolizní proudy (sestaví se tabulka mezičasů), následně se stanoví fázová schémata a zjistí se optimální pořadí fází, pak je možné stanovit délku cyklu a doby jednotlivých zelených pomocí metod uvedených v technických podmínkách TP 81 (metoda saturovaného toku, metoda spotřeby času nebo metoda postupného přibližování), popřípadě lze využít metody operačního výzkumu či simulační metody. Po volbě vhodné metody a provedených výpočtech se zpracuje samotný signální plán – jedná se o grafické znázornění signálních obrazů jednotlivých signálních skupin. Posledním krokem je kapacitní posouzení křižovatky – určení kapacity a rezervy vjezdů, délky front, případně délky řadících pruhů atp. [1], [5]

Pro přehlednost budou pojmy potřebné pro výpočet signálního plánu (fáze, fázové schéma, mezičas atp.) definovány v kapitole Matematický model.

3 Analýza vstupních údajů

K nalezení optimálního řešení signálního plánu vybrané křižovatky bude využit software Witness a jeho nástavby Optimizer. Ta nabízí celkem šest variant optimalizačních algoritmů, které jsou podrobně popsány v kapitole Provedené experimenty a jejich vyhodnocení. Kritériem optimalizování je najít co nejlepší výsledek v co nejkratším čase. Z tohoto důvodu budou jednotlivé algoritmy mezi sebou porovnávány a kombinovány. Jinými slovy jde o nalezení nejvhodnější kombinace algoritmů k optimalizování signálního plánu.

Zadaný úkol bude prováděn na úrovňové křižovatce, která se skládá ze čtyř ramen a každé z nich je řízeno SSZ. V situačním schématu, obrázek 10, jsou jednotlivá SSZ označena červenými značkami. Zde jsou také pomocí písmen a číslic očíslována jednotlivá ramena a řadící pruhy například VA, VB1, VB2 atp. Pro zjednodušení nebudou do výpočtu signálního plánu vstupovat přechody pro chodce.



Obrázek 10 - Zvolená úrovňová průsečná křižovatka [6]

Popis

Ramena křižovatky jsou značena po směru hodinových ručiček – viz situační schéma.

1. První rameno je označeno VA s podélným sklonem vozovky -3,5 %. Rameno je rozděleno do tří řadících pruhů.
 - a. VA1 – Právě odbočení s intenzitou dopravy 110 p.v./h a poloměrem oblouku 15 m.
 - b. VA2 – Přímý směr vedoucí napříč křižovatkou. Profilem stop čáry projede v tomto směru 350 p.v./h a jedná se o nejvytíženější řadící pruh z celé křižovatky
 - c. VA3 – Levé odbočení. Poloměr oblouku je 17 m a intenzita dopravy činí 310 p.v./h.

2. Ramena křižovatky jsou značena po směru hodinových ručiček viz situační schéma. Další v pořadí je tedy rameno s označením VB. I tomu náleží tři řadící pruhy – odbočení vlevo, vpravo a přímý směr. Oproti ramenu VA je vozovka ve stoupání s příčným sklonem 1,8 %.
 - a. VB1 – Právě odbočení s intenzitou 330 p.v./h. Vozidla zde opisují oblouk o poloměru 13 m.
 - b. VB2 – Přímý směr, ve kterém projede profilem stopčáry 220 p.v./h. Přestože vozidla neodbočují, je poloměr oblouku v tomto směru 30 m.
 - c. VB3 – levé odbočení, vozidla se při odbočování pohybují po nejmenším oblouku na křižovatce s poloměrem 5 m. Intenzita dopravy dosahuje 55 p.v./h.

3. Rameno VC reprezentuje vozovku se sklonem 2,5 %. I v tomto případě je rozděleno na tři řadící pruhy. Z důvodu geometrie křižovatky by bylo však obtížné realizovat odbočení vpravo na rameno VB, proto je tento řadící pruh odkloněn od zbylých dvou, čímž je navíc odstraněn křížný kolizní bod viz obrázek 10. Z tohoto důvodu a poměrně nízké intenzity vozidel odbočujících vpravo není tento řadící pruh řízen SSZ. Nachází se zde pouze signál žlutého světla ve tvaru chodce. Zbylé dva řadící pruhy jsou přímý směr a levé odbočení.
 - a. VC1 – Přímý směr vedoucí na rameno VA s intenzitou 280 p.v./h.
 - b. VC2 – Levé odbočení, u kterého vozidla při odbočovacím manévru opisují oblouk o poloměru 18 m. Intenzita dopravy dosahuje hodnoty 110 p.v./h.

4. Čtvrtým ramenem je VD se sklonem 1,8 % a takéž se rozdělujícím na tři řadící pruhy.
- a. VD1 – Pravé odbočení, jedná se o první vjezd na rameni VD. Poloměr oblouku je 11 m a intenzita dopravy je 60 p.v./h.
 - b. VD2 – Přímý směr. Za hodinu projede profilem stopčáry 190 přepočtených vozidel a poloměr oblouku činí 32 m.
 - c. VD3 – Pravé odbočení s intenzitou dopravy 130 p.v./h a poloměrem oblouku 17 m.

4 Matematický model

K určení pevného signálního plánu křižovatek lze přistupovat více způsoby (viz kapitola Teoretická východiska pro řešení práce). Tato část je zaměřena na jeden z citovaných způsobů, a to na metodu operačního výzkumu. V jeho odvětví lineárním programování je možné nalézt dva přístupy tvorby signálního plánu – exaktní a dekompoziční. [7]

Rozdílem mezi uvedenými přístupy je metoda řešení výpočtu. Exaktní přístup je založen na celočíselném, případně smíšeném celočíselném lineárním programování a k řešení úlohy dochází v jednom optimalizačním výpočtu (kroku). U dekompozičního přístupu se využívá spojitě lineární programování nebo rovněž smíšené celočíselné lineární programování. Výpočet je rozdělen do tří kroků – určení minimálního počtu fází, optimálního sledu fází a optimálních časů začátků a konců zelených. [7]

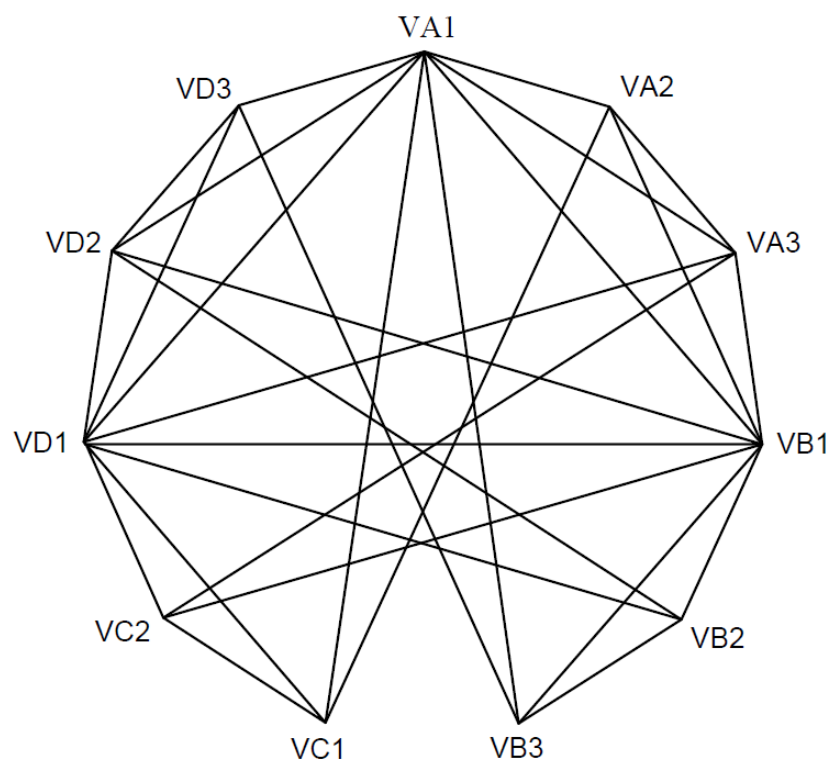
4.1 Dekompoziční přístup

Ke zjištění pevného signálního plánu byl v rámci této práce vybrán dekompoziční přístup, jehož popis bude níže vylíčen spolu s koncepty vztahujícími se k dané problematice.

1. Minimální počet fází

Fáze je časový úsek, ve kterém mají volno současně nekolizní případně podmíněně kolizní dopravní proudy v křižovatce. Postup zjišťování jejich minimálního počtu se skládá ze dvou částí – zjištění všech maximálních podmnožin nekolizních proudů a určení jejich minimálního počtu potřebného k sestavení pevného signálního plánu. [1]

1.1. K určení všech maximálních podmnožin nekolizních proudů je využito základů z teorie grafů. Principem je sestavení grafu bezkoliznosti viz obrázek 11 a vyhledání všech maximálních kompletních podgrafů (u kompletního podgrafu jsou všechny vrcholy spojeny hranou). Graf bezkoliznosti se skládá z vrcholů, které představují dopravní proudy, a hran znázorňujících nekolizní pohyby v křižovatce. [8]



Obrázek 11 - Graf bezkoliznosti pro zvolenou křižovatku

Jednotlivé maximální kompletní podgrafy reprezentují fáze. Tvary fází získané z grafu bezkoliznosti jsou zobrazeny v tabulce 1.

Fáze		Dopravní proudy			
	Fáze 1	VA1	VA2	VA3	VB1
	Fáze 2	VB1	VB2	VD1	VD2
	Fáze 3	VA3	VB1	VC2	VD1
	Fáze 4	VA1	VD1	VD2	VD3
	Fáze 5	VA1	VB1	VD1	VD2
	Fáze 6	VA1	VB1	VB3	
	Fáze 7	VA1	VA2	VC1	
	Fáze 8	VA1	VA3	VD1	
	Fáze 9	VA1	VB3	VD3	
	Fáze 10	VA1	VC1	VD1	
	Fáze 11	VB1	VB2	VB3	
	Fáze 12	VC1	VC2	VD1	

Tabulka 1 - Všechny maximální kompletní podgrafy grafu bezkoliznosti

1.2. V druhé části je snahou získat ze všech maximálních kompletních podgrafů (fází) jejich minimální počet potřebný k sestavení pevného signálního plánu. Využívá se softwaru Xpress – IVE, ve kterém je matematický model napsán. Vstupními údaji modelu jsou všechny fáze získané v předchozím kroku a dopravní proudy. Z těchto údajů je vytvořena matice A, jenž je obsazena dvěma prvky $\{0,1\}$. Jestliže se na pozici a_{ij} nachází číslo 1, potom příslušný dopravní proud náleží dané fázi, je-li na pozici 0, pak daná fáze neobsahuje dopravní proud. Příkladem lze uvést prvek a_{51} , který má hodnotu 1, což znamená, že ve fázi 5 se nachází dopravní proud VA1. Výsledná matice A vstupující do matematického modelu je zapsána formou tabulky a má tvar:

		Dopravní proudy										
		VA1	VA2	VA3	VB1	VB2	VB3	VC1	VC2	VD1	VD2	VD3
Fáze	Fáze 1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	Fáze 2	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
	Fáze 3	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0
	Fáze 4	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	Fáze 5	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0
	Fáze 6	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
	Fáze 7	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	Fáze 8	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
	Fáze 9	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
	Fáze 10	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
	Fáze 11	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
	Fáze 12	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0

Tabulka 2 - Matice A zapsána formou tabulky

Za matici A v modelu následují podmínky zajišťující existenci každého dopravního proudu v alespoň jedné fázi. Pro názornost bude uvedena pouze jedna z nich, a to pro dopravní proud VA1.

$$z(1) + z(4) + z(5) + z(6) + z(7) + z(8) + z(9) + z(10) \geq 1$$

Účelová funkce, která minimalizuje počet možných fází při dodržení výše zmíněné podmínky.

$$pocet_vybranych_fazi := \sum(i \text{ in } faze) z(i)$$

$$minimize(pocet_vybranych_fazi)$$

Výsledný matematický model přepsán do software Xpress – IVE má tvar:

```

model vyber_fazi
uses "mumxprs";

declarations

proud=1..11
faze=1..12
A:array(faze,proud)of real
z:array(faze)of mpvar

end-declarations

A::[1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,
    0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,
    0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,0,
    1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,
    1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,0,0,
    1,0,0,1,0,1,0,0,0,0,0,0,
    1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,
    1,0,1,0,0,0,0,0,1,0,0,0,
    1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,
    1,0,0,0,0,0,1,0,1,0,0,0,
    0,0,0,1,1,1,0,0,0,0,0,0,
    0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,0]

forall(i in faze)z(i)is_binary
z(1)+z(4)+z(5)+z(6)+z(7)+z(8)+z(9)+z(10)>=1
z(1)+z(7)>=1
z(1)+z(3)+z(8)>=1
z(1)+z(2)+z(3)+z(5)+z(6)+z(11)>=1
z(2)+z(11)>=1
z(6)+z(9)+z(11)>=1
z(7)+z(10)+z(12)>=1
z(3)+z(12)>=1
z(2)+z(3)+z(4)+z(5)+z(8)+z(10)+z(12)>=1
z(2)+z(4)+z(5)>=1
z(4)+z(9)>=1

pocet_vybranych_fazi:=sum(i in faze)z(i)
minimize(pocet_vybranych_fazi)

writeln("Minimální počet fází je ",getobjval)
forall(i in faze)writeln("z(",i,")=",getsol(z(i)))

end-model

```

Minimální počet fází je 4
z(1)=1
z(2)=0
z(3)=0
z(4)=1
z(5)=0
z(6)=0
z(7)=0
z(8)=0
z(9)=0
z(10)=0
z(11)=1
z(12)=1

Tabulka 3 - Zápis matematického modelu k určení optimálního počtu fází

Optimalizačním výpočtem bylo zjištěno, že k řízení křižovatky je zapotřebí použít 4 fáze. Jejich tvary jsou přepsány do tabulky 4.

	Dopravní proudy			
Fáze 1	VA1	VA2	VA3	VB1
Fáze 2	VA1	VD1	VD2	VD3
Fáze 3	VB1	VB2	VB3	
Fáze 4	VC1	VC2	VD1	

Tabulka 4 - Tvary nalezených fází matematickým modelem

2. Optimální sled fází

V úvodní části této pasáže budou interpretovány pojmy použité během řešení problematiky – Mezičas a Fázové schéma.

Mezičas

Mezičasem se rozumí časový interval, který začíná koncem zeleného signálu v jednom směru a končí začátkem zeleného signálu v kolizním směru, čímž je zabezpečeno, že nedojde k dopravní nehodě mezi vyklizujícími a z následující fáze najíždějícími vozidly. Pro jeho výpočet slouží vzorec: [1]

$$t_m = \frac{L_v + l_{voz}}{v_v} - \frac{L_n}{v_n} + t_b \quad (1)$$

L_v = Vyklizovací dráha [m]

l_{voz} = Délka vyklizujícího vozidla [m]

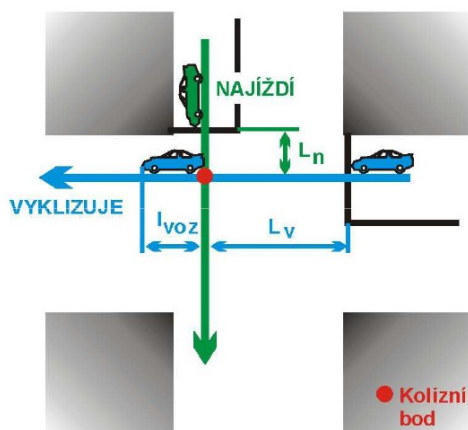
v_v = Rychlost vyklizujícího vozidla [m/s]

L_n = Najíždějí dráha [m]

v_n = Rychlost najíždějího vozidla [m/s]

t_b = Bezpečnostní doba [s]

Uvedené délkové rozměry jsou ilustrovány na obrázku 12. Hodnoty jednotlivých členů vztahu, vyjma najíždějí a vyklizující dráhy, jsou definovány v TP 81. Ve vzorci je uvedena bezpečnostní doba. Ta zajišťuje bezpečný průjezd křižovatkou vozidlům, která již nestihla zastavit v době žluté před její hranicí tak, aby nedošlo k ohrožení dalších účastníků silničního provozu. [1]



Obrázek 12 - Ilustrace délkových rozměrů potřebných k výpočtu mezičasů [1]

Pro zvolenou křižovatku byly všechny délkové rozměry potřebné k výpočtu mezičasů pro kolizní proudy odečteny z CAD souboru. Vypočtené hodnoty jsou vyobrazeny v tabulce mezičasů (viz tabulka 5). Vypočítané hodnoty jsou zaokrouhleny nahoru na celá čísla.

	Najíždějící											
		VA1	VA2	VA3	VB1	VB2	VB3	VC1	VC2	VD1	VD2	VD3
Vyklizující	VA1	-	-	-	-	4	-	-	3	-	-	-
	VA2	-	-	-	-	2	2	-	5	4	4	2
	VA3	-	-	-	-	3	3	5	-	-	3	3
	VB1	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	2
	VB2	5	4	2	-	-	-	4	5	-	-	3
	VB3	-	4	2	-	-	-	4	5	6	4	-
	VC1	-	-	1	3	3	2	-	-	-	1	1
	VC2	4	1	-	-	2	2	-	-	-	3	4
	VD1	-	2	-	-	-	1	-	-	-	-	-
	VD2	-	2	3	-	-	2	6	3	-	-	-
	VD3	-	4	3	5	3	-	5	2	-	-	-

Tabulka 5 - Vypočítané mezičasy

Fázové schéma

Pakliže jsou dopravní proudy přiřazeny k jednotlivým fázím a zvoleno jejich pořadí, vznikne fázové schéma. V souladu s počtem fází se fázové schéma rozděluje na dvoufázové, třífázové, čtyřfázové atd. [1]

Z výsledku prvního kroku matematického modelu a tabulky 4 vyplynulo, že se jedná o čtyřfázové schéma. Problém nastává při určení jejich optimálního pořadí. Pro jednu křižovatku lze totiž sestavit více fázových schémat, a to v závislosti na možných variacích fází.

Výsledné zvolené schéma určuje délky cyklu. K zajištění co největší plynulosti provozu je zapotřebí tuto délku minimalizovat, tudíž se určuje optimální sled fází. Významnou úlohu při jeho zjišťování představují tzv. rozhodující mezičasy $t_{m,r}$ – jedná se o maximální mezičas pro každý fázový přechod a získáme jej z tabulky mezičasů. Veškeré hodnoty rozhodujících mezičasů fázových přechodů pro zvolené fáze jsou obsaženy v tabulce 6. [1]

Fázový přechod			$t_{m,r}$
1	→	2	4
2	→	1	5
1	→	3	3
3	→	1	5
1	→	4	5
4	→	1	4

Fázový přechod			$t_{m,r}$
2	→	3	5
3	→	2	6
2	→	4	6
4	→	2	4
3	→	4	6
4	→	3	3

Tabulka 6 - Rozhodující mezičasy mezi fázovými přechody

Součtem rozhodujících mezičasů všech fázových přechodů ve fázovém schématu získáme součtový mezičas $t_{m,x}$. Optimální sled fází je poté roven fázovému schématu s minimální hodnotou součtového mezičasu, a platí: [1]

$$t_{m,x} = \sum_{i=1}^n t_{m,r} \rightarrow \min \quad (2)$$

x = Pořadové číslo kombinace fází

n = Počet fází

Tato podmínka není dodržována, jestliže se ve fázovém schématu nachází fáze se stejným dopravní proudem. Vzhledem ke zvýšení plynulosti dopravního provozu je podmínkou, že jsou tyto fáze řazeny za sebou. Optimální sled fází se poté stanoví s ohledem na tuto podmínku.

Tento problém nastává i u fází zjištěných v předešlém kroku, kde jsou tři ze čtyř fází na sobě závislé. Z původních šesti možných fázových schémat, zbyly dvě varianty. Jejich tvary společně s vypočítanými součtovými mezičasy jsou zobrazeny v tabulce 7.

Fázové schéma									$t_{m,x}$ [s]
1.	3	→	1	→	2	→	4	=	18
2.	4	→	2	→	1	→	3	=	18

Tabulka 7 - Možné varianty fázových schémat

Jelikož mají obě fázová schémata stejný součtový mezičas, je možné se optimální sled fází libovolně vybrat. V tomto případě byla zvolena první varianta.

3. Optimální časy začátků a konců zelených

Posledním krokem dekompozičního přístupu je stanovení optimálních časů začátků a konců zelených. Pro jejich určení je využit matematický model, který je jako v prvním kroku naprogramován v softwaru Xpress – IVE. Lze jej sestavit v závislosti na volbě optimalizačního kritéria dvěma způsoby – optimalizačním kritériem může být jednak délka cyklu (která se minimalizuje) nebo minimální poměrná rezerva (při výpočtu se maximalizuje). Jelikož budou výsledky matematického modelu porovnávány s výsledky simulačního modelu, bylo vybráno druhé zmíněné optimalizační kritérium – minimální poměrná rezerva. [7]

V modelu se nachází tři proměnné – začátky zelených x_i , konce zelených y_i a minimální poměrná rezerva u , kterou lze interpretovat jako poměr mezi nabízenou dobou zelené a průměrně požadovanou dobou zelené. Model řeší zadaný problém v závislosti na fázovém schématu vybraném z předešlé části, které je během výpočtu konstantní. Dalšími vstupními údaji jsou intenzita vozidel dopravních proudů q , minimální doba zeleného signálu pro každý dopravní proud $tmin$ (podle technických podmínek TP – 81 je $tmin = 5s$), doba potřebná pro vjezd vozidla do křižovatky tau (pro každý dopravní proud byla zvolena hodnota $tau = 2s$, která odpovídá saturovanému toku řadícího pruhu $1800 p.v./h$). Poslední definovanou konstantou je délka cyklu c , která byla stanovena na hodnotu $c = 60s$. Jedná se o délku cyklu, při které se u této křižovatky rovná minimální poměrná rezerva hodnotě $u = 1,2$.

Po definování konstant a proměnných následuje v zápise matematického modelu soustava podmínek. První skupinou jsou podmínky určující stanovené mezičasy mezi dvěma po sobě jdoucími fázemi. Východiskem je fázové schéma zvolené ve druhém kroku dekompozičního přístupu. Mezičasy pochází z tabulky mezičasů (viz tabulka 5). Pro větší přehlednost jsou z ní vybrány vjezdy požadovaných fází a tyto jsou uvedeny v samostatné tabulce. Příkladem lze uvést tabulku mezičasů pro fázový přechod mezi třetí a první fází (viz tabulka 8).

	Najíždějící				
		VA1	VA2	VA3	VB1
	VB1	-	-	-	-
	VB2	5	4	2	-
	VB3	-	4	2	-

Tabulka 8 - Tabulka mezičasů pro fázový přechod mezi třetí a první fází

Jednotlivé dopravní proudy v softwaru Xpress – IVE nenesou označení VA1 až VD3, ale jsou očíslovány po směru hodinových ručiček (1 = VA1, 11 = VD3). Tabulka 8 přepsána do softwaru Xpress – IVE má tvar:

$$x(1) - y(5) \geq 5$$

$$x(2) - y(5) \geq 4$$

$$x(2) - y(6) \geq 4$$

$$x(3) - y(5) \geq 2$$

$$x(3) - y(6) \geq 2$$

Další fázové přechody mají obdobný tvar, rozdílný je až přechod na konci cyklu – fázový přechod mezi čtvrtou a třetí fází, kde se navíc objevuje délka cyklu c . Následuje podmínka určující minimální dobu zelené každého dopravního proudu, podmínka zajišťující, aby požadovaná doba zelené byla menší nebo rovna nabízené době zelené a omezující podmínka délky zelené, která nesmí přesáhnout délku cyklu.

$$forall(i \text{ in } proud) y(i) - x(i) \geq tmin(i)$$

$$forall(i \text{ in } proud) y(i) - x(i) \geq tau(i) * q(i) * c * \frac{u}{3600}$$

$$forall(i \text{ in } proud) y(i) \leq c$$

Kompletní matematický model třetího kroku zapsaný do softwaru Xpress – IVE, včetně výsledků optimalizovaných dob začátku a konců zelených společně minimální poměrnou rezervou je zobrazen na obrázku 13.

The screenshot displays the Xpress-IVE software interface. On the left, the 'model min_c' is defined with various declarations and constraints. On the right, the 'Clear' button is visible, and the solution results are displayed, including the maximum value of the minimum relative reserve and the optimal start and end times for 11 green lights.

```

!@encoding CP1250
model min_c
uses "mmxprs";

declarations
proud=1..11
x:array(proud)of mpvar
y:array(proud)of mpvar
u:mpvar
q:array(proud)of real
tmin:array(proud)of real
tau:array(proud)of real
end-declarations

q:=[110,350,310,330,220,55,280,110,60,190,130]
tmin:=[5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5]
tau:=[2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2]
c:=60

x(1)-y(5)>=5
x(2)-y(5)>=4
x(2)-y(6)>=4
x(3)-y(5)>=2
x(3)-y(6)>=2

x(9)-y(2)>=4
x(10)-y(2)>=4
x(10)-y(3)>=3
x(11)-y(2)>=2
x(11)-y(3)>=3
x(11)-y(4)>=2

x(7)-y(10)>=6
x(7)-y(11)>=5
x(8)-y(1)>=3
x(8)-y(10)>=3
x(8)-y(11)>=2

x(4)+c-y(7)>=3
x(5)+c-y(7)>=3
x(5)+c-y(8)>=2
x(6)+c-y(7)>=2
x(6)+c-y(8)>=2
x(6)+c-y(9)>=1

forall(i in proud)y(i)-x(i)>=tmin(i)
forall(i in proud)y(i)-x(i)>=tau(i)*q(i)*c*u/3600
forall(i in proud)y(i)<=c

forall(i in proud)x(i)is_integer
forall(i in proud)y(i)is_integer

min_pomer_rezerva:=u
maximize(min_pomer_rezerva)

writeln("Maximální hodnota minimální poměrné rezervy je ",getobjval,"")
forall(i in proud)writeln("x(",i,"")=",getsol(x(i)), " s")
forall(i in proud)writeln("y(",i,"")=",getsol(y(i)), " s")

end-model
  
```

Maximální hodnota minimální poměrné rezervy je 1.2

Variable	Value	Unit
x(1)	17	s
x(2)	16	s
x(3)	18	s
x(4)	3	s
x(5)	3	s
x(6)	2	s
x(7)	48	s
x(8)	48	s
x(9)	44	s
x(10)	34	s
x(11)	37	s
y(1)	45	s
y(2)	30	s
y(3)	31	s
y(4)	35	s
y(5)	12	s
y(6)	7	s
y(7)	60	s
y(8)	58	s
y(9)	60	s
y(10)	42	s
y(11)	43	s

Obrázek 13 - Zápis matematického modelu k určení délek zelených a minimální poměrné rezervy

Dle matematického modelu byla zjištěna maximální minimální poměrná rezerva $u = 1,2$ při zadané délce cyklu $c = 60s$. V tabulce 9 jsou zapsány jednotlivé začátky a konce zelených a přepočteny jejich délky.

Dopravní proud	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]
VA1	17	45	28
VA2	16	30	14
VA3	18	31	13
VB1	3	35	32
VB2	3	12	9
VB3	2	7	5
VC1	48	60	12
VC2	48	58	10
VD1	44	60	16
VD2	34	42	8
VD3	37	43	6

Tabulka 9 - Začátky, konce a délky zelených pro délku cyklu s hodnotou 60s

Výsledný signální plán je zobrazen v Příloze A.

4.2 Kapacitní posouzení

Pro znalost signálního plánu zvolené křižovatky je zapotřebí provést její kapacitní posouzení. Vychází se z technických podmínek TP 235 – Posuzování kapacity světelně řízených křižovatek, a zjišťují se parametry jednotlivých vjezdů, mezi které patří rezerva vjezdu, kapacita vjezdu, délka fronty a střední doba zdržení. Některé z uvedených veličin lze také použít jako optimalizační kritérium u simulačního modelu. [5]

Saturovaný tok řadícího pruhu

Saturovaný tok řadícího pruhu je definován jako nejvyšší počet vozidel, který za ideálních podmínek projede profilem stopčáry za jednotku času. Jeho základní hodnota je stanovena v TP – 235 ($S_{zákl} = 2000 p. v./h$), je však ovlivněna řadou faktorů: podélný sklon komunikace, poloměr oblouku, podíl odbočujících vozidel a šířka vjezdu, a přepočítává se podle vztahu: [5], [9]

$$S_i = S_{zákl} \cdot k_{skl} \cdot k_{obl} \quad (3)$$

$$S_{zákl} = \text{Základní saturovaný tok [p. v./h]}$$

$$k_{skl} = \text{Koeficient sklonu}$$

$$k_{obl} = \text{Koeficient oblouku}$$

Koeficient sklonu k_{skl}

Citovaný koeficient vyjadřuje vliv podélného sklonu na saturovaný tok. Platnost vztahu pro jeho výpočet závisí na podélném sklonu vjezdu a [%]. Tento parametr může nabývat pouze hodnoty z intervalu $a \in < 0; 10 >$. Jestliže je vjezd v klesání, pak $a = 0$ %. V opačném případě, pokud sklon bude větší než 10 %, pak $a = 10$ %. [5], [9]

$$k_{skl} = 1 - 0,02 \cdot a \quad (4)$$

$$a = \text{podélný sklon vjezdu [\%]}$$

Koeficient oblouku k_{obl}

Obdobně jako u předchozího koeficientu, i tento vyjadřuje vliv určitého parametru na saturovaný tok. Oproti koeficientu sklonu, zde figurují parametry dva – poloměr oblouku a podíl odbočujících vozidel. Vztah je dán výpočtem: [5], [9]

$$k_{obl} = \frac{R}{R+1,5 \cdot f} \quad (5)$$

R = Poloměr směrového oblouku při odbočování [m]

f = Podíl odbočujících vozidel z celkové intenzity vjezdu [–]

Saturovaný tok vjezdu

Saturovaný tok vjezdu je určen jako součet saturovaných toků řadících pruhů tvořících jeden vjezd, a tedy platí: [5], [9]

$$S_v = \sum_{i=1}^k S_i \quad (6)$$

S_i = Saturovaný tok řadících pruhů [p. v./h]

k = Počet řadících pruhů tvořící jeden vjezd

Efektivní zelené

Stanovení efektivní zelené z' vychází z délky zeleného signálu určeném signálním plánem, který je následně přepočítán podle tabulky 10. [5], [9]

Délka zelené z [s]	Délka efektivní zelené [s]
$z < 5; 7 >$	$z' = z + 1$
$z < 8; 10 >$	$z' = z + 0,5$
$z \geq 11$	$z' = z$

Tabulka 10 - Stanovení efektivní zelené [5], [9]

Hodnoty délek efektivních zelených získaných z matematického modelu jsou uvedeny v tabulce 11.

Vjezdy	Délka zelené z [s]	Délka efektivní zelené z' [s]
VA1	28	28
VA2	14	14
VA3	13	13
VB1	32	32
VB2	9	9,5
VB3	5	6
VC1	12	12
VC2	10	10,5
VD1	16	16
VD2	8	8,5
VD3	6	7

Tabulka 11 - Vypočítané délky efektivních zelených

Kapacita vjezdu

Kapacita vjezdu vyjadřuje, kolik maximálně pojme daný vjezd jednotkových vozidel při zadané délce cyklu, délce efektivní zelené a geometrickém uspořádání vjezdu. Lze ji rozdělit do dvou skupin, a to na kapacitu běžného vjezdu a na kapacitu tvořenou samostatným řadícím pruhem pro podmíněně kolizní levé odbočení. Jelikož u zvolené křižovatky dochází pouze k nekolizním pohybům na křižovatce, je použita kapacita běžného vjezdu C_v , která se vypočítá podle vztahu: [5], [9]

$$C_v = S_v \cdot \frac{z'}{t_c} \quad (7)$$

$$S_v = \text{Saturovaný tok [p. v./h]}$$

$$z' = \text{Délka efektivní zelené [s]}$$

$$t_c = \text{Reálná délka cyklu [s]}$$

Rezerva kapacity Rez

Rezerva kapacity je vyjádřena v procentech a určuje vytiženost daného vjezdu. Lze ji vypočítat podle vztahu: [5], [9]

$$Rez = \left(1 - \frac{I_v}{C_v}\right) \cdot 100 \quad (8)$$

$$I_v = \text{Intenzita vjezdu [p. v./h]}$$

$$C_v = \text{Kapacita vjezdu [p. v./h]}$$

Jestliže $Rez > 0$, je kapacita vjezdu větší než návrhová intenzita vjezdu (vjezd je schopen pojmout případná další vozidla). V opačném případě, kdy $Rez \leq 0$, je rovnou kvalita dopravy na stupni F (překročená kapacita viz tabulka 12)

Délka fronty L_f

Délky fronty v řadícím pruhu na vjezdu je vzdálenost (v metrech) vytvořená vozidly daného vjezdu během jednoho cyklu a stanovuje se vždy před začátkem zelené daného vjezdu. Lze ji vypočítat ze vztahu: [5]

$$L_f = 6,0 \cdot \frac{(t_c - z') \cdot I_v}{3600 \cdot n_p} \quad (9)$$

$$t_c = \text{Reálná délka cyklu [s]}$$

$$z' = \text{Efektivní zelená [s]}$$

$$I_v = \text{Intenzita vjezdu [p. v./h]}$$

$$n_p = \text{Počet řadících pruhů tvořících jeden vjezd}$$

Zvolená křižovatka má každý vjezd tvořen vždy jedním řadícím pruhem. Z tohoto důvodu, je u všech vjezdů $n_p = 1$.

Střední doba zdržení t_w

Poslední částí kapacitního posouzení křižovatky, je určení střední doby zdržení, lze ji vypočítat podle vztahu: [5]

$$t_w = 0,45 \cdot \left[\frac{(t_c - z')^2 \cdot C_v}{C_v \cdot t_c - I_v \cdot z'} + \frac{3600 \cdot I_v}{C_v^2 - I_v \cdot C_v} \right] \quad (10)$$

t_c = Reálná délka cyklu [s]

z' = Efektivní zelená [s]

C_v = Kapacita vjezdu [p. v./h]

I_v = Intenzita vjezdu [p. v./h]

Střední doba zdržení slouží k určení úrovně kvality dopravy. Jednotlivé úrovně jsou uvedeny v tabulce 12. Platí-li $I_v < C_v$, potom úroveň dopravy je rovna stupni F.

Úroveň kvality dopravy		Střední doba zdržení t_w [s]
Označení	Charakteristiky kvality dopravy	
A	Velmi dobrá	≤ 20
B	Dobrá	≤ 35
C	Uspokojivá	≤ 50
D	Dostatečná	≤ 70
E	Nestabilní stav	> 70
F	Překročená kapacita	$\text{Rez} \leq 0$

Tabulka 12 - Stanovení úrovně kvality dopravy podle střední doby zdržení [5]

Výsledné hodnoty získané aplikací výše uvedených vztahů na vybrané křižovatce jsou zapsány v tabulce 13.

Vjezdy	I_v [p.v./h]	f	R [m]	a [%]	k_{skl}	k_{obl}	S_v [p.v./h]	C_v [p.v./h]	Rez [%]	L_f [m]
VA1	110	1	21	0	1.000	0.933	1867	871	87.37	5.87
VA2	350	0	∞	0	1.000	1.000	2000	467	25.00	26.83
VA3	310	1	37	0	1.000	0.961	1922	416	25.56	24.28
VB1	330	1	26	1.8	0.964	0.945	1823	972	66.06	15.40
VB2	220	0	46	1.8	0.964	1.000	1928	305	27.93	18.52
VB3	55	1	10	1.8	0.964	0.870	1677	168	67.19	4.95
VC1	280	0	∞	2.5	0.950	1.000	1900	380	26.32	22.40
VC2	110	1	23	2.5	0.950	0.939	1784	312	64.76	9.08
VD1	60	1	15	1.8	0.964	0.909	1753	467	87.16	4.40
VD2	190	0	48	1.8	0.964	1.000	1928	273	30.44	16.31
VD3	130	1	22	1.8	0.964	0.936	1805	211	38.26	11.48

Tabulka 13 - Vypočítané parametry zvolené křižovatky

Střední doby zdržení vjezdů včetně jejich posouzení úrovně kvality dopravy jsou zaznamenány v tabulce 14.

Vjezdy	t_w [s]	Úroveň kvality dopravy
VA1	8,43	A – Velmi dobrá
VA2	29,65	B – Dobrá
VA3	31,08	B – Dobrá
VB1	8,04	A – Velmi dobrá
VB2	35,28	C – Uspokojivá
VB3	27,33	B – Dobrá
VC1	32,20	B – Dobrá
VC2	22,41	B – Dobrá
VD1	15,55	A – Velmi dobrá
VD2	35,62	C – Uspokojivá
VD3	35,11	C – Uspokojivá

Tabulka 14 - Vypočítané střední doby zdržení a stanovené úrovně kvality dopravy

5 Simulační model

Software Witness 2008 Manufacturing Performance Edition od společnosti Lanner Group byl použit k vytvoření simulačního modelu vybrané křižovatky a její následné optimalizaci. Jedná se o program, který je celosvětově rozšířen a využíván společnostmi napříč mnohými odvětvími průmyslu jako je automobilový, letecký, farmaceutický atp. Aby bylo možné pomocí Witness řešit co nejefektivněji a nejpresněji širokou škálu problémů, umožňuje simulovat diskrétní události i spojité děje.

- Diskrétní simulace událostí – Systém je reprezentován jako chronologický sled událostí, ve kterém každá událost nastane v okamžiku a označí změnu stavu systému. [10]
- Spojitá simulace dějů– Jedná se o simulaci proudících kapalin, případně procesů s velkým objemem dílů jejichž rychlost lze lépe interpretovat jako proudící kapalina. [10]

5.1 Tvorba modelu

Jelikož bude simulační model v následující kapitole optimalizován, je zapotřebí, aby byl co nejjednodušší (složitost by měla za následek prodloužení strojového času), a současně co nejpresnější. K vytvoření modelu křižovatky byly použity tři základní prvky – součást, zásobník a stroj. V následném úseku kapitoly budou tyto prvky popsány společně s jejich konkrétním nastavením pro danou problematiku.

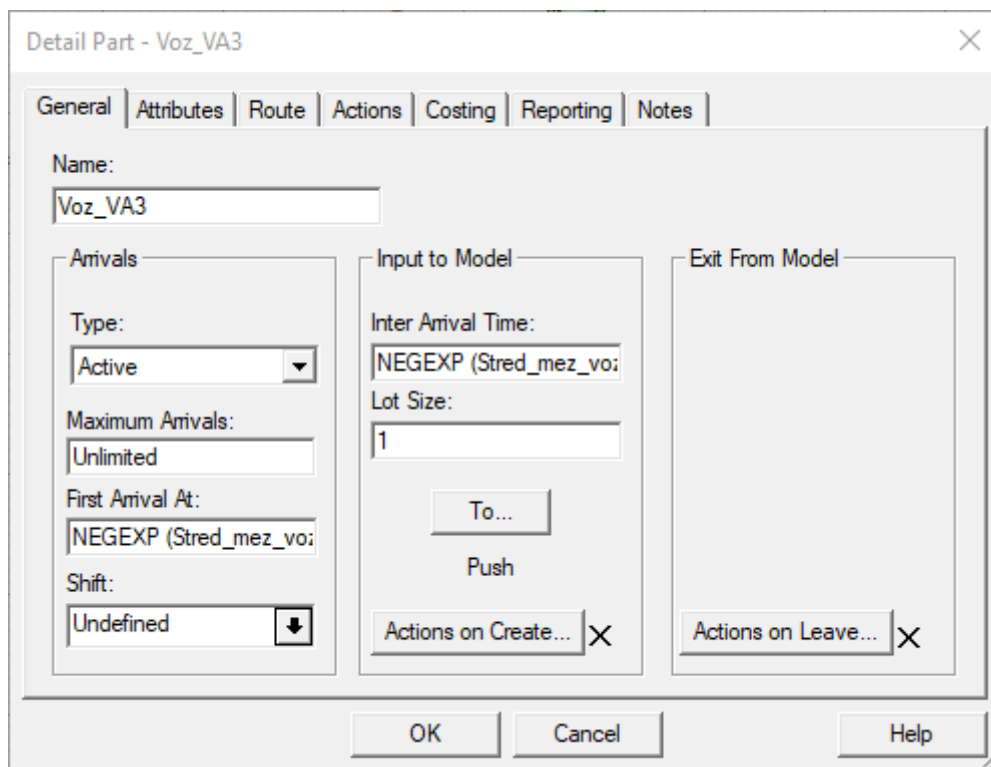


Obrázek 14 - Prvky použité k tvorbě křižovatky v simulačním modelu

5.1.1 Součást (Part)

Jedná se o mobilní prvek (pohybuje se vytvořeným modelem), který může být během simulace různými způsoby upravován. Podle typu simulace může představovat například kontejner v překladišti, balík atd. V této dané situaci byly pomocí součástí namodelována vozidla přijíždějící ke křižovatce. Pro správnou funkci modelu je nezbytné jednotlivé součásti od sebe odlišit, z toho důvodu byla každému řadičímu pruhu přiřazena jedna součást. Dle pruhu jsou označeny – Voz_VA1, Voz_VA2, Voz_VB1 atd. [11]

Nastavení součásti



Obrázek 15 - Nastavení součásti Voz_VA3

U všech součástí v modelu byl nastaven typ Active viz (obrázek 15), který umožňuje zvolit základní údaje dopravního proudu například maximum příjezdů (Maximum Arrivals), čas prvního příjezdu (First Arrival At) nebo časové mezery mezi po sobě jdoucími součástmi (Inter Arrival At).

Jelikož je nutno zohlednit intenzitu dopravy jednotlivých řadících pruhů, byla změněna u každé součásti hodnota First Arrival At a Inter Arrival Time na *NEGEXP (Stred_mez_voz (3))*. Mezery mezi příjezdy vozidel se díky tomu budou řídit exponenciálním rozdělením s parametrem *Stred_mez_voz (3)* – výpočet parametru bude popsán níže, ale hodnotu lze interpretovat jako časový rozestup mezi vozidly v daném řadícím pruhu; v tomto případě je uváděný v sekundách.

5.1.2 Zásobník (Buffer)

Zásobník slouží k ukládání součástí a jeho prostřednictvím se modelují fronty (čekání v obchodě, bance nebo například na letišti), sklady atd. Při vytváření modelu byl zásobník využit právě k simulování fronty vozidel v konkrétním řadícím pruhu, která čekají na zelený signál. Každému řadícímu pruhu byl přidělen jeden zásobník, takže nesou označení Fronta_VA1, Fronta_VA2, Fronta_VA3 atd. [11]

Nastavení zásobníku

Detail Buffer - Fronta_VA3

General | Actions | Costing | Reporting | Notes

Name: Fronta_VA3 Quantity: 1 Capacity: 1000

Input
Option: Rear

Delays
Option: None

Output
Option: First

Search from
☐ Rear
☒ Front

Actions on Input... X

Actions on Output... X

OK Cancel Help

Obrázek 16 - Nastavení zásobníku Fronta_VA3

U zásobníků byla provedena změna kapacity (Capacity) na hodnotu 1000, aby nedocházelo k odmítání vozidel při vstupu. Dále bylo změněno nastavení Input – Option, které určuje, na jaké místo se zařadí vozidlo při příjezdu do fronty. Byla zde zvolena možnost na konec fronty (Rear). Následně bylo upraveno Output – Option určující z jaké pozice bude vozidlo opouštět frontu. Byla zvolena možnost opustit z první pozice (First).

5.1.3 Stroj (Machine)

Stroj představuje v modelu prvek, který přijímá, zpracovává a odesílá součásti. Používá se například k simulaci odbavovacích terminálů na letišti, pokladen v obchodech nebo v tomto případě potřebných návštěvnicků. Stejně jako u předchozích dvou prvků je nutné vložit do modelu jedenáct strojů. Jejich označení je Vjezd_VA1, Vjezd_VA2, Vjezd_VA3 atd. [11]

Nastavení stroje

Detail Machine - Vjezd_VA3

General | Setup | Breakdowns | Fluid Rules | Shift | Actions | Costing | Reporting | Notes

Name: Quantity: Priority: Type:

Input
Quantity:

If

Duration
Cycle Time:

Output
Quantity:

Push

Output From:

Obrázek 17 - Nastavení stroje Vjezd_VA3

Podle typu lze stroje rozdělit – Jednoduchý (Single), Dávkový (Batch), Montážní (Assembly), Produkční (Production) a Obecný (General), přičemž každý z nich je určen k jinému účelu. Pro modelování návěstidla byl zvolen jednoduchý typ. Zde byl nastaven parametr doba obsluhy součásti (Duration – Cycle Time), což v tomto případě znamená, za jakou dobu vozidlo vstoupí do křižovatky. Jelikož bude porovnáván matematický a simulační model mezi sebou, je nutné dodržet hodnotu tohoto parametru u obou modelů stejnou. Proto je zvolena hodnota pro všechny vjezdy 2s (v matematickém modelu byl parametr označen τ).

5.1.4 Vstupní a výstupní pravidla

Po vložení všech základních prvků do modelu, je nutné stanovit jejich úkoly. K tomu slouží vstupní a výstupní pravidla, přičemž v tomto konkrétním modelu byly použity dva druhy – PUSH a PULL. [12]

PUSH

Úkolem výstupního pravidla PUSH je odeslání zpracované součásti dále do systému. V dané situaci bylo aplikováno u součásti, kde po vytvoření vozidla jej poslalo do fronty (zásobníku). Pro všechny součásti v modelu je toto pravidlo stejné, příkladem je uvedeno pro řadící pruh VA3: [12]

PUSH to Fronta_VA3

Dále bylo použito u všech semaforů (strojů), kde byla vozidla po jejich zpracování odeslána ven z modelu.

PUSH to SHIP

PULL

PULL se používá jako vstupní pravidlo, jestliže je zapotřebí odebrat součást z předchozího prvku. V modelu bylo použito pro všechny semaforey (stroje), která odebírají vozidla z fronty – zásobník totiž nedisponuje možností užití jakéhokoliv pravidla. Aby byla zaručena správná funkce návěstidel (vpouštění vozidel do křižovatky v určenou dobu), bylo nutné před pravidlo PULL vložit podmínku *IF*. Celý zápis tohoto pravidla má tvar: [12]

```
IF Aktualni_doba_cyklu >= Zacatek_zeleneho_signalu {3} AND Aktualni_doba_cyklu <= Konec_zeleneho_signalu {3}
  PULL from Fronta_VA3
ELSE
  Wait
ENDIF
```

Obrázek 18 - Příklad pravidla PULL zapsaného v stroji Vjezd_VA3

5.1.5 Vstupní a výstupní údaje

Aby sestavený model simuloval vybranou křižovatku, je nutné definovat vhodné vstupní údaje. Obsahem kapitoly bude zároveň popis výstupních údajů potřebných ke zhodnocení výsledků po provedení optimalizace nebo k porovnání simulačního a matematického modelu.

Cyklování

Cyklování je modelováno pomocí koláčového grafu. V nastavení koláčového grafu byla v kolonce Refresh Interval (Interval obnovy) vepsána 1s. Toto nastavení zapříčiní, že dojde k aktualizaci stavu koláčového grafu právě za tuto dobu. Prvek koláčový graf hraje důležitou roli, při jakékoli prováděné úpravě vztažené k aktuální době cyklu.

Aktuální doba cyklu

Aktuální doba cyklu (*Aktualni_doba_cyklu*) udává dobu v sekundách, ve které se právě nachází signální plán. Po dosažení hodnoty délky cyklu se aktuální doba cyklu vynuluje. Pro formulaci zápisu byl použit koláčový graf, kde byla do akcí napsána podmínka:

```
Aktualni_doba_cyklu = Aktualni_doba_cyklu + 1  
IF Aktualni_doba_cyklu = Delka_cyklu  
Aktualni_doba_cyklu = 0  
ENDIF
```

Obrázek 19 - Stanovení aktuální doby cyklu

Průměrné zdržení ve frontě

Ke zjištění průměrného zdržení ve frontě byla použita funkce *ATIME(Fronta_VA1)*, přičemž se v závorce udává prvek, na kterém chceme funkci aplikovat. Funkce zjišťuje průměrný čas zdržení součásti v zadaném prvku. Pro jejich výpis byl použit prvek s názvem *Prumer_zdrzeni_ve_fronte*. Jelikož je nutné hodnoty dostávat aktuálně během cyklu, bylo využito *Cyklování*, ve kterém byly formulovány podmínky pro každý zásobník. [12]

```
Aktualni_doba_cyklu = Aktualni_doba_cyklu + 1  
Prumer_zdrzeni_ve_fronte (1) = ATIME (Fronta_VA1)  
Prumer_zdrzeni_ve_fronte (2) = ATIME (Fronta_VA2)  
Prumer_zdrzeni_ve_fronte (3) = ATIME (Fronta_VA3)  
Prumer_zdrzeni_ve_fronte (4) = ATIME (Fronta_VB1)  
Prumer_zdrzeni_ve_fronte (5) = ATIME (Fronta_VB2)  
Prumer_zdrzeni_ve_fronte (6) = ATIME (Fronta_VB3)  
Prumer_zdrzeni_ve_fronte (7) = ATIME (Fronta_VC1)  
Prumer_zdrzeni_ve_fronte (8) = ATIME (Fronta_VC2)  
Prumer_zdrzeni_ve_fronte (9) = ATIME (Fronta_VD1)  
Prumer_zdrzeni_ve_fronte (10) = ATIME (Fronta_VD2)  
Prumer_zdrzeni_ve_fronte (11) = ATIME (Fronta_VD3)
```

Obrázek 20 - Stanovení průměrných zdržení v jednotlivých frontách

Délka fronty a průměrná délka fronty

Průměrná délka fronty, která se vypočítá podle technických podmínek, udává, kolik vozidel v průměru se nachází v řadícím pruhu v okamžiku začátku zelené. V softwaru Witness však žádná funkce, která by umožňovala tento údaj zjistit, není, proto byl použit pomocný element *Delka_fronty*. Ten vypisuje počet součástí, které se nacházejí v daný okamžik (začátek zelené) v zásobníku pomocí funkce *NPARTS(Fronta_VA1)*. Všechny hodnoty jsou zaznamenány na list Excelu a následně je vypočítán jejich průměr, který je vynásoben číslem šest (představuje délku vozidla v metrech a jejich rozestup ve frontě). Pro výpočet průměrů jsou použita data ze 120 cyklů. Takto zjištěné hodnoty jsou zpět zobrazeny do prvku *Prumer_fronta_VA1*. Pro zápis bylo taktéž, jako při určení průměrného zdržení ve frontě, využito *Cyklování*. [12]

Na obrázku 21 je uveden zápis ke zjištění délky fronty řadícího pruhu VA1. Ostatní řadící pruhy jsou zapsány obdobně.

```
IF Aktualni_doba_cyklu = Zacatek_zelene (1)
  Delka_fronty_VA1 = NPARTS (Fronta_VA1)
  XLReadArray ("witness.xlsx","List1","A2",Radek)
  XLWriteArray ("witness.xlsx","List1","C" + Radek,Delka_fronty_VA1)
ENDIF
```

Obrázek 21 - Zjištění délky fronty pro řadící pruh VA1

Zápis výpisu průměrných hodnot délek front všech řadících pruhů z Excelu do Witness má tvar:

```
IF TIME = 7200
  XLReadArray ("witness.xlsx","List1","Q2",Prumer_fronta_VA1)
  XLReadArray ("witness.xlsx","List1","Q3",Prumer_fronta_VA2)
  XLReadArray ("witness.xlsx","List1","Q4",Prumer_fronta_VA3)
  XLReadArray ("witness.xlsx","List1","Q5",Prumer_fronta_VB1)
  XLReadArray ("witness.xlsx","List1","Q6",Prumer_fronta_VB2)
  XLReadArray ("witness.xlsx","List1","Q7",Prumer_fronta_VB3)
  XLReadArray ("witness.xlsx","List1","Q8",Prumer_fronta_VC1)
  XLReadArray ("witness.xlsx","List1","Q9",Prumer_fronta_VC2)
  XLReadArray ("witness.xlsx","List1","Q10",Prumer_fronta_VD1)
  XLReadArray ("witness.xlsx","List1","Q11",Prumer_fronta_VD2)
  XLReadArray ("witness.xlsx","List1","Q12",Prumer_fronta_VD3)
ENDIF
```

Obrázek 22 - Zápis výpisu průměrných hodnot délek front z Excelu do Witness

5.1.6 Zahajovací akce (Initialize actions)

Zahajovací akce se vždy automaticky spouštějí při zahájení simulace. Jsou zde definovány parametry – délka zelené, začátek zelené, konec zelené, délka cyklu, hodinové intenzity dopravních proudů, střední mezera mezi vozidly a poměrná rezerva.

Délka zelené

V modelu jsou délky zelených zapisovány do prvku *Delka_zelene*. Pro validaci modelu byly hodnoty převzaty z výsledků matematického modelu, avšak při optimalizaci budou proměnnými. Zápis v zahajovacích akcích je zobrazen na obrázku 23.

```
Delka_zelene (1) = 28  
Delka_zelene (2) = 14  
Delka_zelene (3) = 13  
Delka_zelene (4) = 32  
Delka_zelene (5) = 9  
Delka_zelene (6) = 5  
Delka_zelene (7) = 12  
Delka_zelene (8) = 10  
Delka_zelene (9) = 16  
Delka_zelene (10) = 8  
Delka_zelene (11) = 6
```

Obrázek 23 - Zápis délek zelených pro jednotlivé řadičí pruhy

Začátek zelené

Fázové schéma určující pořadí začátku zelených, bylo také převzato z matematického modelu. Je zobrazeno v tabulce 7 a během optimalizace zůstane neměnné. Při určení hodnot začátků zelených nebylo možné použít stejný tvar zápisu jako u délek zelených (použít výsledné konstantní hodnoty z matematického modelu), a to z důvodu dalšího použití modelu. Během optimalizace budou začátky a konce zelených upravovány. Ve formulaci zápisu jejich stanovení byl brán zřetel na možné varianty mezer mezi kolizními proudy po sobě jdoucích fázích. Jelikož je zápis rozsáhlý, je na obrázku 24 zobrazena pouze jeho nepatrná část.

```

Zacatek_zelene (4) = 3
Zacatek_zelene (5) = 3
Zacatek_zelene (6) = 2
!
IF Zacatek_zelene (5) + Delka_zelene (5) >= Zacatek_zelene (6) + Delka_zelene (6)
Zacatek_zelene (1) = Zacatek_zelene (5) + Delka_zelene (5) + 5
Zacatek_zelene (2) = Zacatek_zelene (5) + Delka_zelene (5) + 4
Zacatek_zelene (3) = Zacatek_zelene (5) + Delka_zelene (5) + 2
ELSEIF Zacatek_zelene (6) + Delka_zelene (6) > Zacatek_zelene (5) + Delka_zelene (5)
Zacatek_zelene (1) = Zacatek_zelene (5) + Delka_zelene (5) + 5
Zacatek_zelene (2) = Zacatek_zelene (6) + Delka_zelene (6) + 4
Zacatek_zelene (3) = Zacatek_zelene (6) + Delka_zelene (6) + 2
ENDIF
!
Zacatek_zelene (9) = Zacatek_zelene (2) + Delka_zelene (2) + 4
!
IF Zacatek_zelene (3) + Delka_zelene (3) - (Zacatek_zelene (2) + Delka_zelene (2)) >= 1
Zacatek_zelene (10) = Zacatek_zelene (3) + Delka_zelene (3) + 3
ELSEIF Zacatek_zelene (3) + Delka_zelene (3) - (Zacatek_zelene (2) + Delka_zelene (2)) < 1
Zacatek_zelene (10) = Zacatek_zelene (2) + Delka_zelene (2) + 4
ENDIF
!
IF Zacatek_zelene (2) + Delka_zelene (2) >= Zacatek_zelene (4) + Delka_zelene (4) AND Zacatek_zelene (2) + Delka_zelene (2) - (Zacatek_zelene (3)
Zacatek_zelene (11) = Zacatek_zelene (2) + Delka_zelene (2) + 2
ELSEIF Zacatek_zelene (4) + Delka_zelene (4) > Zacatek_zelene (2) + Delka_zelene (2) AND Zacatek_zelene (4) + Delka_zelene (4) - (Zacatek_zelene
Zacatek_zelene (11) = Zacatek_zelene (4) + Delka_zelene (4) + 2
ELSE
Zacatek_zelene (11) = Zacatek_zelene (3) + Delka_zelene (3) + 3
ENDIF
!
IF MAX (Zacatek_zelene (1) + Delka_zelene (1), Zacatek_zelene (10) + Delka_zelene (10), Zacatek_zelene (11) + Delka_zelene (11)) = Zacatek_zelene
Zacatek_zelene (7) = Zacatek_zelene (10) + Delka_zelene (10) + 6
Zacatek_zelene (8) = Zacatek_zelene (1) + Delka_zelene (1) + 3
ELSEIF MAX (Zacatek_zelene (1) + Delka_zelene (1), Zacatek_zelene (10) + Delka_zelene (10), Zacatek_zelene (11) + Delka_zelene (11)) = Zacatek_z
Zacatek_zelene (7) = Zacatek_zelene (11) + Delka_zelene (11) + 5
Zacatek_zelene (8) = Zacatek_zelene (1) + Delka_zelene (1) + 3
ELSEIF MAX (Zacatek_zelene (1) + Delka_zelene (1), Zacatek_zelene (10) + Delka_zelene (10), Zacatek_zelene (11) + Delka_zelene (11)) = Zacatek_z
Zacatek_zelene (7) = Zacatek_zelene (10) + Delka_zelene (10) + 6
Zacatek_zelene (8) = Zacatek_zelene (10) + Delka_zelene (10) + 3
ELSEIF MAX (Zacatek_zelene (1) + Delka_zelene (1), Zacatek_zelene (10) + Delka_zelene (10), Zacatek_zelene (11) + Delka_zelene (11)) = Zacatek_z
Zacatek_zelene (7) = Zacatek_zelene (11) + Delka_zelene (11) + 5
Zacatek_zelene (8) = Zacatek_zelene (11) + Delka_zelene (11) + 2
ELSEIF MAX (Zacatek_zelene (1) + Delka_zelene (1), Zacatek_zelene (10) + Delka_zelene (10), Zacatek_zelene (11) + Delka_zelene (11)) = Zacatek_z
Zacatek_zelene (7) = Zacatek_zelene (10) + Delka_zelene (10) + 6
Zacatek_zelene (8) = Zacatek_zelene (10) + Delka_zelene (10) + 3
ENDIF

```

Obrázek 24 - Část zápisu stanovení začátků zelených všech řadičích pruhů

Výsledné hodnoty začátků zelených jsou v simulačním modelu zobrazeny v prvku s označením *Zacatek_zelene*.

Konec zelené

Obdobně jako u začátků zelených, i pro určení konců zelených bylo potřebné stanovit obecné řešení v závislosti na mezičasech. Hodnoty při provedení simulace jsou zobrazeny v *Konec_zelene*. Výsledný zápis v zahajovacích akcích má tvar:

```
Konec_zelene (6) = Zacatek_zelene (6) + Delka_zelene (6)
Konec_zelene (5) = Zacatek_zelene (5) + Delka_zelene (5)
IF Konec_zelene (4) - Zacatek_zelene (11) >= -2
    Konec_zelene (4) = Zacatek_zelene (11) - 2
ELSE
    Konec_zelene (4) = Zacatek_zelene (4) + Delka_zelene (4)
ENDIF
!
IF Konec_zelene (1) - Zacatek_zelene (8) >= -3
    Konec_zelene (1) = Zacatek_zelene (8) - 3
ELSE
    Konec_zelene (1) = Zacatek_zelene (1) + Delka_zelene (1)
ENDIF
Konec_zelene (2) = Zacatek_zelene (2) + Delka_zelene (2)
Konec_zelene (3) = Zacatek_zelene (3) + Delka_zelene (3)
!
IF Konec_zelene (9) >= Zacatek_zelene (7) + Delka_zelene (7) OR Konec_zelene (9) >= Zacatek_zelene (8) + Delka_zelene (8)
    Konec_zelene (9) = MAX (Zacatek_zelene (7) + Delka_zelene (7), Zacatek_zelene (8) + Delka_zelene (8))
ELSE
    Konec_zelene (9) = Zacatek_zelene (9) + Delka_zelene (9)
ENDIF
Konec_zelene (10) = Zacatek_zelene (10) + Delka_zelene (10)
Konec_zelene (11) = Zacatek_zelene (11) + Delka_zelene (11)
!
Konec_zelene (7) = Zacatek_zelene (7) + Delka_zelene (7)
Konec_zelene (8) = Zacatek_zelene (8) + Delka_zelene (8)
.
```

Obrázek 25 - Zápis stanovení konců zelených všech řadících pruhů

Délka cyklu

Délka cyklu se určí v závislosti na konci zelené u proudů v poslední fázi. Na obrázku 26 je stejně jako u začátku zelených zobrazena pouze část zápisu podmínky.

```
IF MIN (Zacatek_zelene (4)Zacatek_zelene (5)Zacatek_zelene (6)) = Zacatek_zelene (4) AND Konec_zelene (7) >= Konec_zelene (8) AND Zacatek_zelene (4) >= 0 AND Zacatek_zelene (4) <= 2
Delka_cyklu = Konec_zelene (7) + 3 - Zacatek_zelene (4)
ELSEIF MIN (Zacatek_zelene (4)Zacatek_zelene (5)Zacatek_zelene (6)) = Zacatek_zelene (4) AND Zacatek_zelene (4) >= 0 AND Zacatek_zelene (4) <= 2 AND Zacatek_zelene (5) >= 0 AND Zac
IF Zacatek_zelene (4) = Zacatek_zelene (5)
Delka_cyklu = Konec_zelene (8) + 2 - Zacatek_zelene (5)
ELSEIF Zacatek_zelene (4) - Zacatek_zelene (5) = -1
Delka_cyklu = Konec_zelene (8) + 2 - Zacatek_zelene (4)
ELSEIF Zacatek_zelene (4) - Zacatek_zelene (5) = -2 AND Konec_zelene (8) - Konec_zelene (7) = 1
Delka_cyklu = Konec_zelene (7) + 3 - Zacatek_zelene (4)
ELSEIF Zacatek_zelene (4) - Zacatek_zelene (5) = -2 AND Konec_zelene (8) - Konec_zelene (7) > 1
Delka_cyklu = Konec_zelene (8) + 3 - Zacatek_zelene (5)
ELSEIF Zacatek_zelene (4) - Zacatek_zelene (5) = -3 AND Konec_zelene (8) - Konec_zelene (7) >= 1 AND Konec_zelene (8) - Konec_zelene (7) <= 3
Delka_cyklu = Konec_zelene (7) + 3 - Zacatek_zelene (4)
ELSEIF Zacatek_zelene (4) - Zacatek_zelene (5) = -3 AND Konec_zelene (8) - Konec_zelene (7) > 3
Delka_cyklu = Konec_zelene (8) + 3 - Zacatek_zelene (5)
ENDIF
ELSEIF MIN (Zacatek_zelene (4)Zacatek_zelene (5)Zacatek_zelene (6)) = Zacatek_zelene (4) AND Zacatek_zelene (4) >= 0 AND Zacatek_zelene (4) <= 2 AND Zacatek_zelene (5) > 3
IF Konec_zelene (7) >= Konec_zelene (8)
Delka_cyklu = Konec_zelene (7) + 3 - Zacatek_zelene (4)
ELSEIF Konec_zelene (7) < Konec_zelene (8)
Delka_cyklu = Konec_zelene (8)
ENDIF
ENDIF
ELSEIF MIN (Zacatek_zelene (4)Zacatek_zelene (5)Zacatek_zelene (6)) = Zacatek_zelene (5) AND Zacatek_zelene (5) >= 0 AND Zacatek_zelene (5) <= 2 AND Zacatek_zelene (4) = Zacatek_zel
Delka_cyklu = MAX (Konec_zelene (7), Konec_zelene (8)) + 3 - Zacatek_zelene (4)
ELSEIF MIN (Zacatek_zelene (4)Zacatek_zelene (5)Zacatek_zelene (6)) = Zacatek_zelene (5) AND Zacatek_zelene (5) >= 0 AND Zacatek_zelene (5) <= 2 AND Zacatek_zelene (5) - Zacatek_zel
IF Konec_zelene (7) - Konec_zelene (8) >= -1
Delka_cyklu = Konec_zelene (7) + 3 - Zacatek_zelene (5)
ELSEIF Konec_zelene (7) - Konec_zelene (8) < -1
Delka_cyklu = Konec_zelene (8) + 2 - Zacatek_zelene (5)
ENDIF
ELSEIF MIN (Zacatek_zelene (4)Zacatek_zelene (5)Zacatek_zelene (6)) = Zacatek_zelene (5) AND Zacatek_zelene (5) >= 0 AND Zacatek_zelene (5) <= 2 AND Zacatek_zelene (5) - Zacatek_zel
Delka_cyklu = Konec_zelene (7) + 3 - Zacatek_zelene (5)
ELSEIF MIN (Zacatek_zelene (4)Zacatek_zelene (5)Zacatek_zelene (6)) = Zacatek_zelene (5) AND Zacatek_zelene (5) >= 0 AND Zacatek_zelene (5) <= 2 AND Zacatek_zelene (5) - Zacatek_zel
Delka_cyklu = Konec_zelene (8) + 3 - Zacatek_zelene (5)
ENDIF
ELSEIF MIN (Zacatek_zelene (4)Zacatek_zelene (5)Zacatek_zelene (6)) = Zacatek_zelene (6) AND Konec_zelene (7) - Konec_zelene (8) >= -1 AND Zacatek_zelene (4) <= Zacatek_zelene (5) AND
Delka_cyklu = MAX (Konec_zelene (7), Konec_zelene (8)) + 2 - Zacatek_zelene (6)
ELSEIF MIN (Zacatek_zelene (4)Zacatek_zelene (5)Zacatek_zelene (6)) = Zacatek_zelene (6) AND Konec_zelene (7) - Konec_zelene (8) >= -1 AND Zacatek_zelene (4) > Zacatek_zelene (5) AND
Delka_cyklu = MAX (Konec_zelene (7), Konec_zelene (8)) + 2 - Zacatek_zelene (6)
ELSEIF MIN (Zacatek_zelene (4)Zacatek_zelene (5)Zacatek_zelene (6)) = Zacatek_zelene (6) AND Zacatek_zelene (6) = Zacatek_zelene (4) AND Konec_zelene (7) - Konec_zelene (8) >= -1 AND
Delka_cyklu = MAX (Konec_zelene (7), Konec_zelene (8)) + 3 - Zacatek_zelene (6)
ELSEIF MIN (Zacatek_zelene (4)Zacatek_zelene (5)Zacatek_zelene (6)) = Zacatek_zelene (6) AND Zacatek_zelene (6) = Zacatek_zelene (5) AND Konec_zelene (7) - Konec_zelene (8) >= -1 AND
Delka_cyklu = MAX (Konec_zelene (7), Konec_zelene (8)) + 3 - Zacatek_zelene (6)
ELSEIF MIN (Zacatek_zelene (4)Zacatek_zelene (5)Zacatek_zelene (6)) = Zacatek_zelene (6) AND Zacatek_zelene (4) <= Zacatek_zelene (5) AND Zacatek_zelene (4) > 3 AND Zacatek_zelene (6)
Delka_cyklu = MAX (Konec_zelene (7), Konec_zelene (8)) + 2 - Zacatek_zelene (6)
ELSEIF MIN (Zacatek_zelene (4)Zacatek_zelene (5)Zacatek_zelene (6)) = Zacatek_zelene (6) AND Zacatek_zelene (6) > Zacatek_zelene (5) AND Zacatek_zelene (5) > 3 AND Zacatek_zelene (6)
Delka_cyklu = MAX (Konec_zelene (7), Konec_zelene (8)) + 2 - Zacatek_zelene (6)
ELSEIF MIN (Zacatek_zelene (4)Zacatek_zelene (5)Zacatek_zelene (6)) = Zacatek_zelene (6) AND Konec_zelene (7) - Konec_zelene (8) < -1 AND Zacatek_zelene (6) >= 0 AND Zacatek_zelene (6)
Delka_cyklu = MAX (Konec_zelene (7), Konec_zelene (8)) + 2 - Zacatek_zelene (6)
ELSEIF MIN (Zacatek_zelene (4)Zacatek_zelene (5)Zacatek_zelene (6)) >= 3
Delka_cyklu = MAX (Konec_zelene (7), Konec_zelene (8))
ENDIF
```

Obrázek 26 - Část zápisu stanovení délky cyklu

Hodinové intenzity dopravních proudů

Hodinové intenzity jsou určeny v kapitole – Analýza vstupních údajů. V modelu se zobrazují v prvku s názvem *Hodinove_intenzity*. Jedná se o konstantní hodnoty, které se dále používají k výpočtům středních mezer mezi vozidly. Zápis má tvar:

```
Hodinove_intenzity (1) = 110
Hodinove_intenzity (2) = 350
Hodinove_intenzity (3) = 310
Hodinove_intenzity (4) = 330
Hodinove_intenzity (5) = 220
Hodinove_intenzity (6) = 55
Hodinove_intenzity (7) = 280
Hodinove_intenzity (8) = 110
Hodinove_intenzity (9) = 60
Hodinove_intenzity (10) = 190
Hodinove_intenzity (11) = 130
```

Obrázek 27 - Stanovené hodinové intenzity všech řadících pruhů

Střední mezera mezi vozidly

Střední mezera mezi vozidly je doba mezi dvěma po sobě jedoucimi vozidly. Je určena v sekundách a vypočítá se:

$$Stred_mez_voz(i) = \frac{60}{Hodinove_intenzity(i)} \quad (11)$$

$$i = Dopravní\ proud$$

Hodnoty se dále využívají u nastavení součásti, jako parametru u exponenciálního rozdělení. Zápis stanovení střední doby mezi vozidly uvedený v zahajovacích akcích zde nebude zobrazen, jelikož se jedná o výše uvedený vztah.

Poměrná rezerva

S odkazem na výše uvedené, jedná se o poměr mezi nabízenou dobou zelené a průměrně požadovanou dobou zelené. K tomu, aby bylo možné porovnat matematický a simulační model, při optimalizaci bude poměrná rezerva představovat optimalizační kritérium. Obdobně jako o střední mezery mezi vozidly nebude uveden zápis v zahajovacích akcích, jelikož se jedná o přepsání vztahu:

$$Pomerna_rezerva(i) = \frac{3600 \cdot Delka_zelene(i)}{2 \cdot Hodinove_intenzity(i) \cdot Delka_cyklu} \quad (12)$$

$$i = Dopravní\ proud$$

Jedná se o vztah, který je taktéž uveden v matematickém modelu.

Výsledný tvar simulačního modelu s výsledky po provedení 120 cyklů, je zobrazen v Příloze B.

5.2 Porovnání výsledných hodnot středních dob zdržení a délek front zjištěných pomocí TP – 235 a simulačního modelu

K porovnání matematického a simulačního modelu byly použity výsledky středních dob zdržení a délek front v řadících pružích. U matematického modelu se vycházelo ze vzorců pro výpočet těchto hodnot uvedených v TP – 235 a u simulačního modelu byly hodnoty odečteny ze statistik příslušného prvku po provedení 120 cyklů (získaly se bodové odhady).

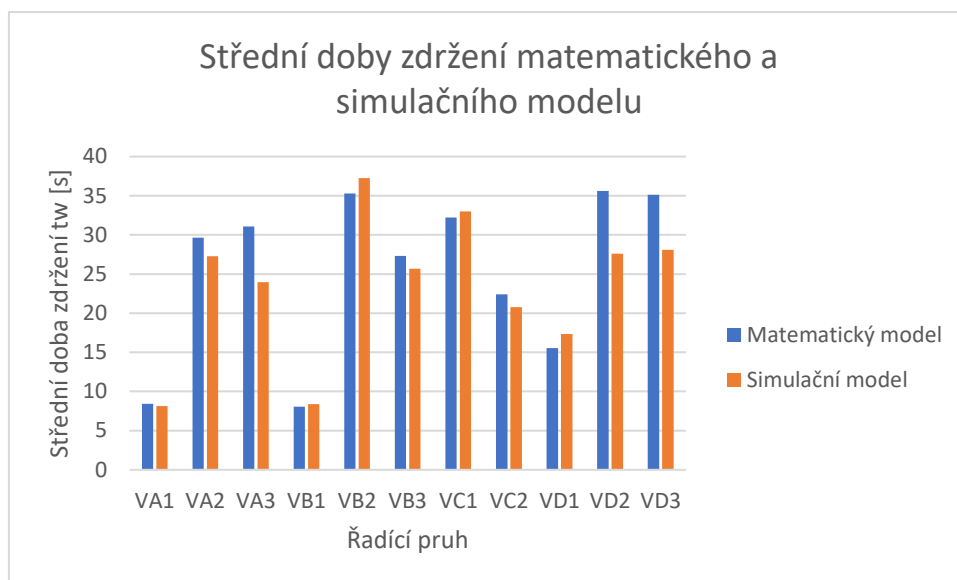
Středí doba zdržení

Z tabulky 15 je patrné, že při porovnání zmíněných dvou modelů, se hodnoty odchylek středních dob zdržení pohybují okolo 2s (všechny tyto odchylky jsou pod 12%) s výjimkou třech řadících pruhů, kde jsou odchylky v rozmezí mezi 7s a 8s (pohybují se kolem 20%).

		Matematický model	Simulační model		
		t_w [s]	t_w [s]	Odchylka [s]	Odchylka [%]
Řadící pruhy	VA1	8.43	8.14	0.29	3.44
	VA2	29.65	27.28	2.37	7.99
	VA3	31.08	23.96	7.12	22.91
	VB1	8.04	8.39	0.35	4.35
	VB2	35.28	37.26	1.98	5.61
	VB3	27.33	25.66	1.67	6.11
	VC1	32.20	32.98	0.78	2.42
	VC2	22.41	20.77	1.64	7.32
	VD1	15.55	17.34	1.79	11.51
	VD2	35.62	27.60	8.02	22.52
	VD3	35.11	28.09	7.02	19.99

Tabulka 15 - Srovnání středních dob zdržení stanovených TP 235 a pomocí simulačního modelu

Pro lepší porovnání středních dob zdržení matematického a simulačního modelu jsou hodnoty zobrazeny v grafu na obrázku 28.



Obrázek 28 - Srovnání středních dob zdržení stanovených TP 235 a pomocí simulačního modelu

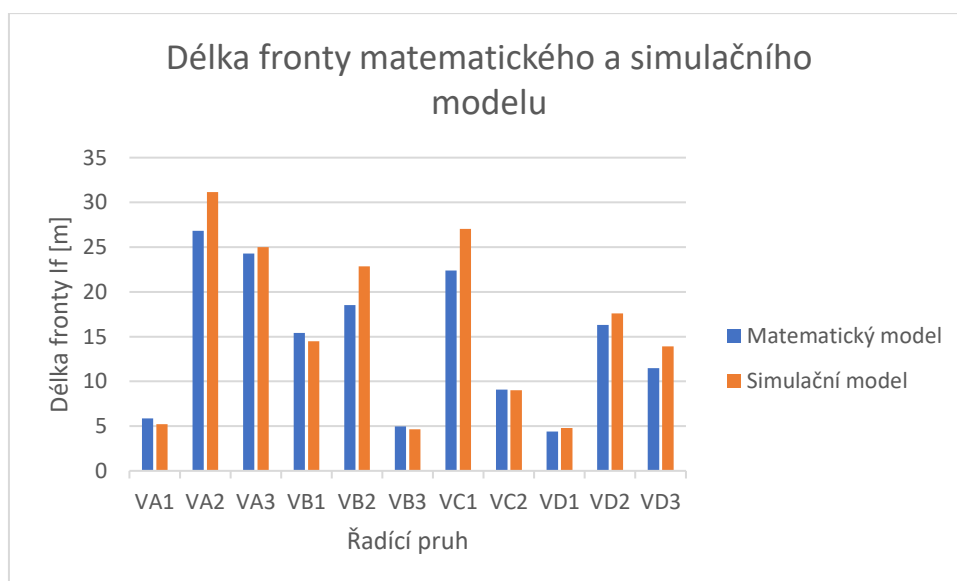
Délka fronty

Hodnoty délek front pro matematický a simulační model a jejich odchylky jsou zobrazeny v tabulce 16. Zde lze vidět, že s výjimkou čtyřech řadících pruhů jsou odchylky kolem 1s, tedy pod 12%. Shodně jako u středních dob zdržení jsou i u zbylých pruhů odchylky kolem 20%. I zde to může být způsobeno zvoleným exponenciálním rozdělením u přijíždějících vozidel.

		Matematický model	Simulační model		
		L_f [m]	L_f [m]	Odchylka [m]	Odchylka [%]
Řadící pruhy	VA1	5.87	5.20	0.67	11.41
	VA2	26.83	31.15	4.32	16.10
	VA3	24.28	25.00	0.72	2.97
	VB1	15.40	14.47	0.93	6.04
	VB2	18.52	22.84	4.32	23.33
	VB3	4.95	4.64	0.31	6.26
	VC1	22.40	27.05	4.65	20.76
	VC2	9.08	9.00	0.08	0.88
	VD1	4.40	4.80	0.40	9.09
	VD2	16.31	17.60	1.29	7.91
	VD3	11.48	13.90	2.42	21.08

Tabulka 16 - Srovnání délek front stanovených TP 235 a pomocí simulačního modelu

Graf znázorňující rozdíly délek front mezi matematickým a simulačním modelem je zobrazen na obrázku 29.



Obrázek 29 - Srovnání délek front stanovených TP 235 a pomocí simulačního modelu

V obou situacích mohou být větší odchylky zapříčiněny zvoleným exponenciálním rozdělením příjezdů vozidel do fronty v simulačním modelu. TP – 235 vycházejí z logaritmicko-normálního rozdělení.

6 Provedené experimenty a jejich vyhodnocení

Tato kapitola je zaměřena na experimenty provedené na simulačním modelu pomocí optimalizačního nástroje Optimizer, který je součástí simulačního programu Witness. Jelikož tento nástroj disponuje šesti různými algoritmy a cílem optimalizace je při zadaných podmínkách najít co nejlepší řešení v co nejkratším čase, budou jednotlivé algoritmy mezi sebou porovnávány. Maximální přijatelná délka cyklu je omezena na hodnotu 90s. Pokud je při řešení hodnota dosažena, dojde k ukončení optimalizace, v druhém případě se co nejefektivněji zúží rozsah řešení. Kvalita dílčích výsledků je srovnána s výsledky získanými matematickým modelem.

Úprava simulačního modelu

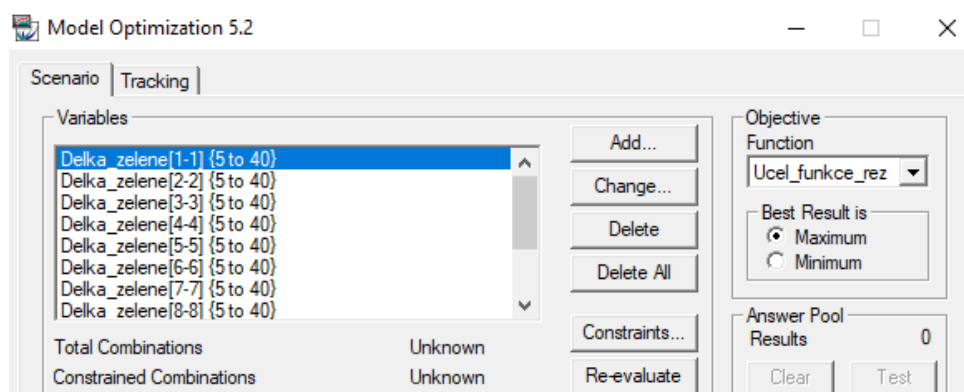
Aby bylo možno použít optimalizační nástroj Optimizer, bylo zapotřebí do simulačního modelu přidat prvek *Function*. Do něj bylo vloženo optimalizační kritérium sloužící k určení kvality řešení, které splňuje stanovené podmínky. Při porovnávání matematického a simulačního modelu bylo tímto kritériem minimální poměrná rezerva, která se v průběhu optimalizace maximalizuje. Její tvar lze napsat ve tvaru: [13]

$$Min_pomer_rez = \min[Pomerna_rezerva(i)] \rightarrow Max$$

$$i = Počet\ dopravních\ proudů$$

Nastavení optimalizačního nástroje Optimizer

U nástroje Optimizer bylo nutno zvolit takovou proměnnou, jenž se během optimalizačního běhu bude měnit. Výběrem se stala *Delka_zelene*, protože ostatní parametry simulačního modelu jsou na ni závislé. Minimální hodnota délky zelené byla stanovena podle TP na 5s a maximální hodnota byla zvolena 40s. Zápis jednotlivých délek zelených je zobrazen na obrázku 30.



Obrázek 30 - Nastavení rozsahu řešení pomocí délek zelených

Současně tento nástroj dovoluje určit podmínky, pomocí kterých by bylo možno zmenšit rozsah řešení. Vzorově lze uvést stanovení maximální hodnoty délky cyklu. Podmínky lze psát pouze ve tvaru rovnic či nerovnic, přičemž jedna strana rovnice obsahuje zvolené proměnné (pouze ty, které jsou uvedené v tabulce Variables, v tomto případě se jedná o délky zelených) a druhá je určena konstantou (požadovaná hodnota). Při řešení určené problematiky nebyla tato možnost využita.

U některých použitých algoritmů bylo nastaveno Maximum evaluations (maximální počet kroků, po kterých dojde k zastavení optimalizace) případně Maximum number of unique solutions to generate (počet unikátních generovaných řešení – pouze u algoritmu Random Solutions) na hodnotu 500, která byla postupně navyšována na 16000.

6.1 Algoritmy

All Combinations

Algoritmus, který při hledání optimálního řešení problému systematicky prochází všechny možné kombinace. Využívá se v případě, jestliže je prohledávaný prostor malý, nebo pokud došlo v předešlých krocích k jeho redukci. [14]

Six Sigma

Vychází z algoritmu Adaptive Thermostatistical SA, nicméně je zde přidána podmínka, která nepovolí více než x změn. Kdykoliv je během optimalizace překročený limit, přenastaví se parametry. Úkolem je nalézt optimální řešení problému, které je závislé na sigma hodnocení – kvalita a spolehlivost procesů se přibližuje k hodnotě 6 sigma. Pro řešení dané problematiky tento algoritmus není použit. [14]

Adaptive Thermostatistical Simulated Annealing (SA)

Jedná se o stochastický optimalizační algoritmus, který byl inspirován metalurgickým procesem – žíháním. Algoritmus vychází z Metropolisova algoritmu (Metropolis a spol. navrhli metodu Monte Carlo simulující fyzikální vývoj systému směrem k tepelné rovnováze pro danou teplotu), jehož snaha je zabránění uvíznutí v lokálním extrému, jak je tomu u algoritmu Hill Climb. Princip spočívá v přijmutí horšího řešení (za určitých podmínek) namísto lepšího. Tento krok se provádí s určitou pravděpodobností, která se během optimalizace snižuje tak, aby bylo optimální řešení nalezeno. [14], [15]

Hill Climb

Algoritmus Hill Climb – Horolezecký algoritmus – je gradientní metoda hledání extrému v lokálním okolí bodu. Princip spočívá v prohledávání nejbližšího okolí nejlepšího nalezeného řešení. Jestliže takové řešení ještě neexistuje (začátek optimalizace), dojde k jeho náhodnému vygenerování (v rámci rozsahu proměnných). Pokud již existuje toto řešení, proběhne v dalším kroku malá změna v jeho parametrech. Při nalezení lepšího řešení se přijme, v opačném případě proběhne další drobná změna v parametrech. Díky tomuto postupu existuje závislost mezi novým a předcházejícím řešením, což má za následek, že dochází k uvíznutí v lokálním extrému. [14]

Random Solutions

Jak už z překladu názvu vyplývá, tento algoritmus při hledání optimálního řešení generuje unikátní náhodné kombinace. Využíván je v situacích, kdy je zapotřebí zúžit rozsah proměnných. [14]

Min/Mid/Max

Podobně jako u algoritmu All Combinations dochází k systematickému testování všech možností, avšak s odlišením, že prohledávaný prostor se skládá pouze z minimálních, maximálních a středních hodnot všech proměnných. [14]

6.2 Experimenty

Při výše zadaných rozsazích délek zelených dosahuje počet možností řádově hodnoty 10^{17} , tudíž nebylo možno k řešení použít jen algoritmus All Combinations, protože doba trvání optimalizace by trvala několik let (předpokládaný čas optimalizace pro řešení řádově 10^9 možností je 3048 dní).

Z důvodu dosažení co nejlepšího řešení, bylo nutno mezi jednotlivými optimalizacemi v daném algoritmu zúžit rozsah řešení. K tomu byly využity výsledné hodnoty optimalizace, jejichž součástí jsou délky zelených (každá hodnota minimální poměrné rezervy má unikátní kombinaci délek zelených), které byly vloženy do simulačního modelu. Po zjištění délky cyklu tímto způsobem byly délky zelených přepočítány pomocí vztahu:

$$z_i = \frac{u \cdot 2 \cdot c \cdot I_i}{3600} \quad (13)$$

i = Počet dopravních proudů

z = Délka zelené [s]

u = Minimální poměrná rezerva

c = Délka cyklu [s]

I = Hodinová intenzita vozidel [p. v./h]

Proto byly u jednotlivých dopravních proudů zajištěny podobné hodnoty poměrných rezerv jako byla její minimální výše. Takto zjištěné délky zelených byly zpět vloženy do simulačního modelu, kde vypočítaná délka cyklu stanovovala, zda budou tyto délky určovat dolní nebo horní mez rozsahu. Jestliže bylo nalezeno více stejných hodnot minimální poměrné rezervy, byla vybrána jedna vzorová kombinace.

6.2.1 Adaptive Thermostatistical Simulated Annealing (SA)

Zaměření dané podkapitoly je na řešení problematiky pouze pomocí algoritmu Adaptive Thermostatistical SA. Tento algoritmus společně s Hill Climb nabízí možnost nastavení hodnot Maximum evaluations (byla popsána výše) a Maximum moves without improvements. Druhá zmíněná hodnota stanovuje počty kroků, po kterých dojde k zastavení optimalizace v případě, že nedojde ke zlepšení výsledné hodnoty minimální poměrné rezervy.

V první části byl při optimalizaci rozsah řešení nezměněn od zadání. Maximální nalezená hodnota minimální poměrné rezervy činila 1,442, přičemž tohoto výsledku bylo dosaženo při prvním experimentu. V následujících experimentech hodnota pouze klesala a ustálila se na 1,303. Průběh experimentů s výsledky je zapsán v tabulce 17.

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum evaluations	Maximum moves without improvements	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Adapt. Thermo.	1	500	100	1,442	00:00:56	107
Adapt. Thermo.	2	1000	200	1,389	00:03:28	106
Adapt. Thermo.	3	2000	400	1,303	00:01:52	113
Adapt. Thermo.	4	4000	800	1,303	00:03:30	113
Adapt. Thermo.	5	8000	3200	1,303	00:09:40	113
Adapt. Thermo.	6	16000	6400	1,303	00:13:35	113

Tabulka 17 - Výsledné hodnoty po první optimalizaci algoritmem Adaptive Thermostatistical SA

Simulační model, do kterého byly zapsány délky zelených stanovené při optimalizaci společně s minimální poměrnou rezervou 1,442, vypočítal délku cyklu $c = 107s$. Tato délka byla následně vložena do matematického modelu. Vzájemné srovnání obou modelů pro tuto délku cyklu je zobrazeno v tabulce 18. Je zřejmé, že výsledné hodnoty minimálních poměrných rezerv jsou shodné. Matematický model však obsahuje délky zelených, jejichž hodnoty jsou větší než 40s, jelikož zde nebyla určena omezující podmínka stejně jako tomu bylo u simulačního modelu.

	Simulační model			Matematický model		
Hodnota minimální poměrné rezervy	1,442			1,442		
	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]
VA1	24	43	19	25	77	52
VA2	23	53	30	24	54	30
VA3	21	49	28	22	49	27
VB1	0	37	37	1	54	53
VB2	0	19	19	1	20	19
VB3	0	18	18	0	5	5
VC1	80	104	24	81	105	24
VC2	77	95	18	80	105	25
VD1	57	69	12	91	106	15
VD2	57	74	17	58	75	17
VD3	55	75	20	56	76	20
Délka cyklu [s]	107			107		

Tabulka 18 - Srovnání výsledných hodnot získaných simulačním a matematickým modelem

V druhé části bylo zapotřebí co nejefektivněji zúžit rozsah řešení, protože pro minimální poměrnou rezervu 1,442 byla délka cyklu vypočítána 107s. Z tohoto důvodu byla použita hodnota 1,389, kde se délka cyklu po přepočítání rovnala 99s. Délky zelených pak určovaly horní mez rozsahu. Následná provedená optimalizace se stejně jako v první části skládala z šesti experimentů. Výsledné zjištěné parametry jsou zobrazeny v tabulce 19. Z ní je patrné, že při omezení rozsahu řešení, byly všechny zjištěné hodnoty minimální poměrné rezervy rovny 1,303. Délka cyklu je poté rovna hodnotě 74s.

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum evaluations	Maximum moves without improvements	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Adapt. Thermo.	1	500	100	1,303	00:00:41	74
Adapt. Thermo.	2	1000	200	1,303	00:01:36	74
Adapt. Thermo.	3	2000	400	1,303	00:01:58	74
Adapt. Thermo.	4	4000	800	1,303	00:02:52	74
Adapt. Thermo.	5	8000	3200	1,303	00:03:02	74
Adapt. Thermo.	6	16000	6400	1,303	00:03:14	74

Tabulka 19 - Výsledné hodnoty po druhé optimalizaci algoritmem Adaptive Thermostatistical SA

Z komparace simulačního modelu s matematickým modelem, které je zobrazeno v tabulce 20, vyplývá, že při shodných délkách cyklů jsou objevené hodnoty minimálních poměrných rezerv totožné.

	Simulační model			Matematický model		
Hodnota minimální poměrné rezervy	1,303			1,303		
	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]
VA1	17	25	8	20	54	34
VA2	16	35	19	19	38	19
VA3	14	33	19	17	34	17
VB1	0	21	21	3	38	35
VB2	0	12	12	3	15	12
VB3	0	5	5	2	10	8
VC1	56	71	15	59	74	15
VC2	53	60	7	57	72	15
VD1	39	44	5	58	74	16
VD2	39	50	11	42	53	11
VD3	37	45	8	40	54	14
Délka cyklu [s]	74			74		

Tabulka 20 - Srovnání výsledných hodnot získaných simulačním a matematickým modelem

Jelikož délka cyklu byla po dosažení získaných hodnot do simulačního modelu pouze 74s, bylo realizováno druhé zúžení, ve kterém přepočítané délky zelených stanovovaly dolní mez. Tabulka 21 zachycuje získané hodnoty minimálních poměrných rezerv po provedené třetí optimalizaci, která již proběhla s oboustranným zúžením. Při experimentech byla dosažena maximální minimální poměrné rezervy 1,398, avšak délka cyklu spojená s touto hodnotou přesahuje stanovené maximum 90s. Z tohoto důvodu byla za maximální nalezené řešení považována hodnota 1,388, jejíž délka cyklu je 88s.

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum evaluations	Maximum moves without improvements	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Adapt. Thermo.	1	500	100	1,363	00:00:44	83
Adapt. Thermo.	2	1000	200	1,363	00:01:07	83
Adapt. Thermo.	3	2000	400	1,363	00:01:36	83
Adapt. Thermo.	4	4000	800	1,398	00:02:17	92
Adapt. Thermo.	5	8000	3200	1,388	00:05:52	88
Adapt. Thermo.	6	16000	6400	1,388	00:05:51	88

Tabulka 21 - Výsledné hodnoty po třetí optimalizaci algoritmem Adaptive Thermostatistical SA

Tabulka 22 zobrazuje srovnání matematického modelu se simulačním modelem. Je zřejmé, že hodnoty minimálních poměrných rezerv jsou si rovny, bylo by možné toto řešení považovat za optimální.

	Simulační model			Matematický model		
Hodnota minimální poměrné rezervy	1,388			1,388		
	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]
VA1	20	28	8	23	64	41
VA2	19	43	24	22	46	24
VA3	17	39	22	20	46	26
VB1	0	25	25	3	48	45
VB2	0	15	15	3	18	15
VB3	0	5	5	2	12	10
VC1	66	85	19	69	88	19
VC2	63	72	9	67	86	19
VD1	47	52	5	72	88	16
VD2	47	60	13	50	63	13
VD3	45	54	9	50	63	13
Délka cyklu [s]	88			88		

Tabulka 22 - Srovnání výsledných hodnot získaných simulačním a matematickým modelem

6.2.2 Random Solutions

Druhým použitým algoritmem byl Random Solutions. U tohoto algoritmu bylo nutné stanovit Maximum number of unique solutions to generate a je zřejmé, že čím více unikátních generovaných řešení, tím delší je doba trvání optimalizace. Naproti tomu se zvyšuje pravděpodobnost nalezení optimálního řešení pro zadané podmínky. Shodně jako u předcházejícího algoritmu, bylo v první části, kde rozsah řešení nebyl změněn, provedeno 6 experimentů. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 23. Maximální hodnota minimální poměrné rezervy byla zjištěna posledním experimentem, její hodnota činí 1,364. Doba optimalizace trvala přibližně jednu hodinu. Poté byly nalezené délky zelených vloženy do simulačního modelu, pomocí kterého se stanovila délka cyklu $c = 140s$.

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum number of unique solutions to generate	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Random Solutions	1	500	1,212	00:01:45	108
Random Solutions	2	1000	1,212	00:03:08	108
Random Solutions	3	2000	1,212	00:06:22	108
Random Solutions	4	4000	1,286	00:13:18	149
Random Solutions	5	8000	1,286	00:34:57	149
Random Solutions	6	16000	1,364	00:56:21	140

Tabulka 23 - Výsledné hodnoty po první optimalizaci algoritmem Random Solutions

Pro porovnání obou modelů byla hodnota délky cyklu 140s vložena do matematického modelu, přičemž minimální poměrná rezerva byla stanovena na 1,506.

	Simulační model			Matematický model		
Hodnota minimální poměrné rezervy	1,364			1,506		
	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]
VA1	29	49	20	31	100	69
VA2	28	66	38	30	71	41
VA3	26	60	34	28	65	37
VB1	0	35	35	0	71	71
VB2	0	24	24	0	26	26
VB3	0	6	6	0	20	20
VC1	101	137	36	104	137	33
VC2	98	121	23	103	138	35
VD1	70	85	15	119	139	20
VD2	70	95	25	75	98	23
VD3	68	92	24	73	89	16
Délka cyklu [s]	140			140		

Tabulka 24 - Srovnání výsledných hodnot získaných simulačním a matematickým modelem

Jelikož je vypočítaná délka cyklu větší než maximálně přípustná, bylo realizováno zmenšení rozsahu podle minimální poměrné rezervy s hodnotou 1,212. Výsledné zjištěné hodnoty stanovené druhou optimalizací jsou uvedeny v tabulce 25. Maximální minimální poměrná rezerva, která byla získána, má hodnotu 1,254. Délky zelených s ní spojené byly vloženy do simulačního modelu, který spočítal délku cyklu rovnu 82s.

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum number of unique solutions to generate	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Random Solutions	1	500	1,145	00:01:38	71
Random Solutions	2	1000	1,157	00:03:12	80
Random Solutions	3	2000	1,157	00:06:15	80
Random Solutions	4	4000	1,243	00:13:38	79
Random Solutions	5	8000	1,254	00:32:46	82
Random Solutions	6	16000	1,254	00:53:21	82

Tabulka 25 - Výsledné hodnoty po druhé optimalizaci algoritmem Random Solutions

Tabulka 26 uvádí výsledné minimální poměrné rezervy společně s délkami zelených, které byly stanoveny pomocí simulačního a matematického modelu. Jejich hodnoty jsou vztaženy k délce cyklu 82s, z čehož vyplývá, že pro uvedenou délku nabízí matematický model minimální poměrnou rezervu rovnu hodnotě 1,333, což je větší než u simulačního modelu. Optimalizaci pomocí nástroje Optimizer, nebylo tedy nalezeno optimální řešení.

	Simulační model			Matematický model		
Hodnota minimální poměrné rezervy	1,254			1,333		
	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]
VA1	21	29	8	22	60	38
VA2	20	41	21	21	43	22
VA3	18	38	20	19	39	20
VB1	0	22	22	3	43	40
VB2	0	16	16	3	17	14
VB3	0	5	5	2	11	9
VC1	63	79	16	65	82	17
VC2	60	68	8	63	80	17
VD1	45	50	5	66	82	16
VD2	45	57	12	47	59	12
VD3	43	51	8	45	59	14
Délka cyklu [s]	82			82		

Tabulka 26 - Srovnání výsledných hodnot získaných simulačním a matematickým modelem

Všechny výsledné délky cyklů stanovené v této části se pohybovaly okolo 80s, proto bylo provedeno druhé zmenšení rozsahu, tentokrát pomocí hodnoty 1,254. Přepočítané délky zelených poté představovaly dolní mez rozsahu. V tabulce 27 jsou uvedeny výsledné nalezené hodnoty minimálních poměrných rezerv a k nim pomocí simulačního modelu vypočítané délky cyklů. V posledním experimentu bylo nalezeno řešení, jenž by se dalo považovat za optimální, tudíž byla další optimalizace (zúžení rozsahu a provádění dalších experimentů) pomocí tohoto algoritmu zastavena.

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum number of unique solutions to generate	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Random Solutions	1	500	1,347	00:01:27	84
Random Solutions	2	1000	1,347	00:03:16	89
Random Solutions	3	2000	1,370	00:06:29	89
Random Solutions	4	4000	1,370	00:13:21	89
Random Solutions	5	8000	1,372	00:28:37	89
Random Solutions	6	16000	1,379	00:51:23	89

Tabulka 27 - Výsledné hodnoty po třetí optimalizaci algoritmem Random Solutions

Z následující tabulky 28, kde je zobrazeno srovnání simulačního modelu s matematickým, je patrné, že pro uvedenou délku cyklu 89s nabízí matematický model shodou hodnotu minimální poměrné rezervy a to 1,379. Nelze však určit, zda se jedná o globální nebo lokální maximum.

	Simulační model			Matematický model		
Hodnota minimální poměrné rezervy	1,379			1,379		
	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]
VA1	20	28	8	23	65	42
VA2	19	43	24	22	46	24
VA3	17	39	22	20	47	27
VB1	0	23	23	3	53	50
VB2	0	15	15	3	18	15
VB3	0	5	5	2	12	10
VC1	66	86	20	69	89	20
VC2	63	71	8	68	87	19
VD1	47	52	5	73	89	16
VD2	47	60	13	50	63	13
VD3	45	55	10	55	64	9
Délka cyklu [s]	89			89		

Tabulka 28 - Srovnání výsledných hodnot získaných simulačním a matematickým modelem

6.2.3 Hill Climb

Dalším algoritmem, který byl použit pro optimalizaci, byl algoritmus Hill Climb. Stejně jako u předchozích algoritmů, bylo nalezení optimálního řešení rozděleno na několik částí s ohledem na rozsah řešení. S odkazem na citaci výše, u algoritmu Hill Climb dochází k uvíznutí v lokálním extrému, což nastalo i v tomto případě. V první části dosáhla výsledná hodnota minimální poměrné rezervy vždy velikosti 1,130, a to bez ohledu na změny v nastavení. Doba trvání optimalizace byla potom u všech provedených experimentů pod jednu minutu, jak je patrné z tabulky 29. Simulačním modelem zjištěné hodnoty délek cyklů jsou u všech experimentů totožné a rovnají se 91s.

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum evaluations	Maximum moves without improvements	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Hill Climb	1	500	100	1,130	00:00:58	91
Hill Climb	2	1000	200	1,130	00:00:58	91
Hill Climb	3	2000	400	1,130	00:00:59	91
Hill Climb	4	4000	800	1,130	00:00:57	91
Hill Climb	5	8000	3200	1,130	00:00:56	91
Hill Climb	6	16000	6400	1,130	00:00:54	91

Tabulka 29 - Výsledné hodnoty po první optimalizaci algoritmem Hill Climb

Výsledné hodnoty minimálních poměrných rezerv společně se začátky, konci a délkami zelených pro jednotlivé proudy stanovené simulačním a matematickým modelem jsou zobrazeny v tabulce 30.

	Simulační model			Matematický model		
Hodnota minimální poměrné rezervy	1,130			1,356		
	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]
VA1	26	66	40	24	66	42
VA2	25	45	20	23	47	24
VA3	23	46	23	21	48	27
VB1	0	27	27	3	55	52
VB2	0	21	21	3	19	16
VB3	0	21	21	2	12	10
VC1	72	88	16	71	91	20
VC2	69	86	17	69	89	20
VD1	49	61	12	75	91	16
VD2	49	66	17	51	65	14
VD3	49	67	18	57	66	9
Délka cyklu [s]	91			91		

Tabulka 30 - Srovnání výsledných hodnot získaných simulačním a matematickým modelem

I zde dochází k překročení přípustné hodnoty délky cyklu, takže byl na základě zjištěné hodnoty minimální poměrné rezervy 1,130 zúžen rozsah řešení. Po následné provedené druhé optimalizaci bylo zjištěno, že shodně jako v předchozím případě došlo k uvíznutí v lokálním extrému. Průběh experimentů se zjištěnými hodnotami je uveden v tabulce 31. Délky cyklů stanovených simulačním modelem jsou navzájem shodné a rovnají se 114s.

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum evaluations	Maximum moves without improvements	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Hill Climb	1	500	100	1,263	00:00:37	114
Hill Climb	2	1000	200	1,263	00:00:39	114
Hill Climb	3	2000	400	1,263	00:00:38	114
Hill Climb	4	4000	800	1,263	00:00:39	114
Hill Climb	5	8000	3200	1,263	00:00:37	114
Hill Climb	6	16000	6400	1,263	00:00:38	114

Tabulka 31 - Výsledné hodnoty po druhé optimalizaci algoritmem Hill Climb

Tabulka 32 zobrazuje srovnání hodnot minimálních poměrných rezerv a délek zelených stanovených simulačním a matematickým modelem při shodné délce cyklu.

	Simulační model			Matematický model		
Hodnota minimální poměrné rezervy	1,263			1,444		
	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]
VA1	26	37	11	29	82	53
VA2	25	53	28	28	60	32
VA3	23	48	25	32	61	29
VB1	0	33	33	3	69	66
VB2	0	21	21	3	24	21
VB3	0	21	21	2	16	14
VC1	86	111	25	88	114	26
VC2	83	112	29	85	112	27
VD1	57	69	12	98	114	16
VD2	57	80	23	64	82	18
VD3	55	81	26	71	83	12
Délka cyklu [s]	114			114		

Tabulka 32 - Srovnání výsledných hodnot získaných simulačním a matematickým modelem

Protože byla i zde přesažena maximální stanovená hodnota délky cyklu, bylo uskutečněno další zúžení rozsahu. To spočívalo v přepočítání délek zelených spojených s určitou hodnotou minimální poměrné rezervy. V tomto případě byla pouze jediná možnost, a to hodnota 1,363. Zjištěné minimální poměrné rezervy byly u všech šesti provedených experimentů totožné. Jejich hodnoty společně s vypočítanými délkami cyklů jsou uvedeny v tabulce 33.

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum evaluations	Maximum moves without improvements	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Hill Climb	1	500	100	1,363	00:00:06	83
Hill Climb	2	1000	200	1,363	00:00:06	83
Hill Climb	3	2000	400	1,363	00:00:06	83
Hill Climb	4	4000	800	1,363	00:00:07	83
Hill Climb	5	8000	3200	1,363	00:00:07	83
Hill Climb	6	16000	6400	1,363	00:00:06	83

Tabulka 33 - Výsledné hodnoty po třetí optimalizaci algoritmem Hill Climb

Srovnání matematického a simulačního modelu, respektive výsledných nalezených minimálních poměrných rezerv a k nim vztažených délek zelených při zadaných délkách cyklů, je uvedeno v tabulce 34.

	Simulační model			Matematický model		
Hodnota minimální poměrné rezervy	1,363			1,363		
	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]
VA1	19	27	8	22	61	39
VA2	18	40	22	21	43	22
VA3	16	40	24	19	44	25
VB1	0	23	23	3	45	42
VB2	0	14	14	3	17	14
VB3	0	5	5	2	11	9
VC1	62	80	18	65	83	18
VC2	59	68	9	64	81	17
VD1	44	49	5	67	83	16
VD2	44	56	12	47	59	12
VD3	43	52	9	47	60	13
Délka cyklu [s]	83			83		

Tabulka 34 - Srovnání výsledných hodnot získaných simulačním a matematickým modelem

Poněvadž existoval předpoklad, že lze nalézt lepší řešení, bylo v následujícím kroku provedeno zúžení rozsahu už shora citovaným způsobem (viz kapitola Experimenty). Výsledné hodnoty zjištěných minimálních poměrných rezerv jsou zobrazeny v tabulce 35. U všech provedených experimentů byly tyto hodnoty vzájemně shodné a zároveň byly totožné s předchozí částí. Jelikož byl rozsah řešení upravován u všech použitých algoritmů stejným postupem, tedy na základě výsledných hodnot z předchozího kroku, nebylo tedy možné použít jiný způsob úpravy a dosáhnout tak rozdílného výsledku. Výsledná minimální poměrná rezerva stanovená algoritmem Hill Climb je rovna 1,363 a odpovídá tomu délka cyklu 83s.

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum evaluations	Maximum moves without improvements	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Hill Climb	1	500	100	1,363	00:00:11	83
Hill Climb	2	1000	200	1,363	00:00:11	83
Hill Climb	3	2000	400	1,363	00:00:12	83
Hill Climb	4	4000	800	1,363	00:00:12	83
Hill Climb	5	8000	3200	1,363	00:00:11	83
Hill Climb	6	16000	6400	1,363	00:00:11	83

Tabulka 35 - Výsledné hodnoty po čtvrté optimalizaci algoritmem Hill Climb

6.2.4 Min/Mid/Max

Posledním použitým algoritmem byl Min/Mid/Max, který v první optimalizaci otestoval 177 147 variant a našel hodnotu minimální poměrné rezervy rovnu 1,294. Doba trvání optimalizace společně s ostatními zjištěnými parametry je uvedena v tabulce 36. Tento algoritmus nedisponuje možnostmi jakýkoliv změn, proto byl proveden pouze jeden experiment. Po dosažení nalezených hodnot délek zelených do simulačního modelu, byla zjištěna hodnota délky cyklu $c = 159s$.

Použitý algoritmus	Experiment	Evaluations	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Min/Mid/Max	1	177147	1,294	11:49:57	159

Tabulka 36 - Výsledné hodnoty po první optimalizaci algoritmem Min/Mid/Max

V tabulce níže jsou zobrazeny zjištěné hodnoty matematického modelu po zadání délky cyklu, která byla získána ze simulačního modelu. Je patrné, že výsledné hodnoty minimálních poměrných rezerv si nejsou navzájem rovny. Při zadané délce cyklu nabízí matematický model větší násobek průměrné nabízené doby zelené. Je však nutné podotknout, že výsledné délky zelených v matematickém modelu nejsou shora omezeny, jak je tomu u simulačního modelu, dochází tedy k překročení hodnoty 40s.

	Simulační model			Matematický model		
Hodnota minimální poměrné rezervy	1,294			1,536		
	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]
VA1	45	67	22	37	114	77
VA2	44	84	40	36	84	48
VA3	42	82	40	34	77	43
VB1	0	40	40	2	84	82
VB2	0	40	40	2	32	30
VB3	0	40	40	2	23	21
VC1	116	156	40	120	158	38
VC2	113	153	40	117	157	40
VD1	88	128	40	135	158	23
VD2	88	110	22	88	114	26
VD3	86	108	22	86	112	26
Délka cyklu [s]	159			159		

Tabulka 37 - Srovnání výsledných hodnot získaných simulačním a matematickým modelem

Druhá část spočívala, shodně jako u všech předchozích algoritmů, v omezení rozsahu, přičemž po přepočítání délek zelených byla stanovena horní mez. Poté byla provedena optimalizace, ve které bylo odzkoušeno 118 098 možností a byla získána minimální poměrná rezerva s hodnotou 1,444. Délka cyklu byla simulačním modelem vypočítána na 136s. V tabulce 38 jsou uvedeny výsledné parametry optimalizace.

Použitý algoritmus	Experiment	Evaluations	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Min/Mid/Max	1	118098	1,444	07:28:01	136

Tabulka 38 - Výsledné hodnoty po první optimalizaci algoritmem Min/Mid/Max

Ze srovnání získaných hodnot minimálních poměrných rezerv a délek zelených, které byly určeny pomocí simulačního a matematického modelu, je zřejmé, že při stejných délkách cyklu je hodnota minimální poměrné rezervy u simulačního modelu nižší než u matematického modelu.

	Simulační model			Matematický model		
Hodnota minimální poměrné rezervy	1,444			1,504		
	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]
VA1	30	43	13	31	97	66
VA2	29	69	40	30	70	40
VA3	27	62	35	30	66	36
VB1	0	38	38	1	72	71
VB2	0	25	25	1	26	25
VB3	0	6	6	2	19	17
VC1	101	133	32	102	134	32
VC2	98	111	13	100	134	34
VD1	73	80	7	116	135	19
VD2	73	95	22	74	96	22
VD3	71	86	15	74	89	15
Délka cyklu [s]	136			136		

Tabulka 39 - Srovnání výsledných hodnot získaných simulačním a matematickým modelem

Délka cyklu 136s by při použití jiných algoritmů vedla k zúžení rozsahu a provedení další optimalizace. Po zjištění přepočítaných délek zelených byla proto určena nová horní mez rozsahu, oproti stávající se však výrazně nezměnila. Předpokládaný čas optimalizace byl stanoven na sedm hodin. Jak již bylo uvedeno, principem tohoto algoritmu je systematické prohledání prostoru, jenž se skládá z kombinací minimálních, středních a maximálních hodnot všech proudů. Výsledná hodnota minimální poměrné rezervy tedy nemůže být menší, než hodnota stanovená přepočtenými délkami zelených (jednalo by se o hodnotu 1,48). Z tohoto důvodu byl další postup ukončen.

6.2.5 Kombinace algoritmů

Vyjma aplikace výhradně jednoho algoritmu k nalezení optimálního řešení existuje také eventualita využití jejich kombinace. Otázkou zůstává, zda tímto způsobem dojde k nalezení optimálního řešení případně jak dlouhý časový úsek potrvá celý proces optimalizace. V této kapitole nebyly z důvodu přehlednosti uvedeny dílčí srovnání simulačního a matematického modelu.

Hledání optimálního řešení bylo, stejně jako u ostatních algoritmů, rozděleno do několika částí, přičemž v každé z nich (kromě první části) bylo provedeno zúžení rozsahu a byly otestovány všechny možné algoritmy. Algoritmus, jehož minimální poměrná rezerva umožňovala nejefektivnější zúžení rozsahu, byl určen pro tu část jako primární a doba trvání jeho optimalizace byla v závěru použita k určení celkové doby. Pakliže to bylo reálné z časového hlediska, byl ihned použit algoritmus All Combinations, který vždy nalezne optimální řešení.

Jelikož byly vstupní parametry jak pro tuto první část, tak pro ostatní počáteční části předchozích použitých algoritmů shodné, bylo vycházeno z jejich výsledných hodnot zapsaných v příslušných tabulkách u daných algoritmů. Z těchto hodnot byla z důvodu nejefektivnějšího zúžení, po přepočítání délek zelených, vybrána hodnota minimální poměrné rezervy 1,212, která byla získána pomocí algoritmu Random Solutions. Přepočítané délky zelených určovaly horní mez.

Po zúžení rozsahu následovala druhá optimalizace. Výsledné dosažené hodnoty všech aplikovaných algoritmů jsou zobrazeny v tabulkách 40 až 43. Algoritmus All Combinations z časového hlediska nebylo v této části stále možné použít. Musel by otestovat řádově 10^9 možností a předpokládaná doba optimalizace by trvala 3048 dní.

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum evaluations	Maximum moves without improvements	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Adapt. Thermo.	1	500	100	1,240	00:00:48	66
Adapt. Thermo.	2	1000	200	1,259	00:01:26	65
Adapt. Thermo.	3	2000	400	1,259	00:01:29	65
Adapt. Thermo.	4	4000	800	1,259	00:02:04	65
Adapt. Thermo.	5	8000	3200	1,259	00:02:45	65
Adapt. Thermo.	6	16000	6400	1,262	00:03:40	69

Tabulka 40 - Výsledné hodnoty po druhé optimalizaci algoritmem Adaptive Thermostatistical SA – Kombinace algoritmů

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum number of unique solutions to generate	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Random Solutions	1	500	1,145	00:01:38	71
Random Solutions	2	1000	1,157	00:03:12	80
Random Solutions	3	2000	1,157	00:06:15	80
Random Solutions	4	4000	1,243	00:13:38	79
Random Solutions	5	8000	1,254	00:32:46	82
Random Solutions	6	16000	1,254	00:53:21	82

Tabulka 41 - Výsledné hodnoty po druhé optimalizaci algoritmem Random Solutions – Kombinace algoritmů

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum evaluations	Maximum moves without improvements	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Hill Climb	1	500	100	0,974	00:00:31	42
Hill Climb	2	1000	200	0,974	00:00:26	42
Hill Climb	3	2000	400	0,974	00:00:26	42
Hill Climb	4	4000	800	0,974	00:00:26	42
Hill Climb	5	8000	1600	0,974	00:00:28	42
Hill Climb	6	16000	3200	0,974	00:00:30	42

Tabulka 42 - Výsledné hodnoty po druhé optimalizaci algoritmem Hill Climb – Kombinace algoritmů

Použitý algoritmus	Experiment	Evaluations	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Min/Mid/Max	1	177147	1,388	01:09:38	92

Tabulka 43 - Výsledné hodnoty po druhé optimalizaci algoritmem Min/Mid/Max – Kombinace algoritmů

Po otestování všech přijatelných algoritmů byla dosažena maximální hodnota minimální poměrné rezervy 1,388, jenž byla zjištěna algoritmem Min/Mid/Max. Délky zelených souvisejících s touto hodnotou však určovaly délky cyklu 92s, což je víc než maximálně stanovená. Další délky cyklů měly hodnoty okolo 80s. Následné provedení zúžení rozsahu bylo realizováno pomocí minimální poměrné rezervy s hodnotou 1,254, která byla určena algoritmem Random Solutions. Získané hodnoty po uskutečnění další optimalizace jsou zobrazeny v tabulkách 44 až 48. U algoritmu Random Solutions jsou hodnoty shodné s tabulkou 27, jelikož byly postupy zúžení rozsahu totožné.

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum evaluations	Maximum moves without improvements	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Adapt. Thermo.	1	500	100	1,363	00:00:22	83
Adapt. Thermo.	2	1000	200	1,363	00:00:36	83
Adapt. Thermo.	3	2000	400	1,363	00:00:43	83
Adapt. Thermo.	4	4000	800	1,363	00:00:50	83
Adapt. Thermo.	5	8000	3200	1,363	00:00:56	83
Adapt. Thermo.	6	16000	6400	1,363	00:00:59	83

Tabulka 44 - Výsledné hodnoty po třetí optimalizaci algoritmem Adaptive Thermostatistical SA – Kombinace algoritmů

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum number of unique solutions to generate	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Random Solutions	1	500	1,347	00:01:27	84
Random Solutions	2	1000	1,347	00:03:16	89
Random Solutions	3	2000	1,370	00:06:29	89
Random Solutions	4	4000	1,370	00:13:21	89
Random Solutions	5	8000	1,372	00:28:37	89
Random Solutions	6	16000	1,379	00:51:23	89

Tabulka 45 - Výsledné hodnoty po třetí optimalizaci algoritmem Random Solutions – Kombinace algoritmů

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum evaluations	Maximum moves without improvements	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Hill Climb	1	500	100	1,363	00:00:06	83
Hill Climb	2	1000	200	1,363	00:00:06	83
Hill Climb	3	2000	400	1,363	00:00:06	83
Hill Climb	4	4000	800	1,363	00:00:06	83
Hill Climb	5	8000	1600	1,363	00:00:06	83
Hill Climb	6	16000	3200	1,363	00:00:06	83

Tabulka 46 - Výsledné hodnoty po třetí optimalizaci algoritmem Hill Climb – Kombinace algoritmů

Použitý algoritmus	Experiment	Evaluations	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Min/Mid/Max	1	8748	1,388	00:29:43	92

Tabulka 47 - Výsledné hodnoty po druhé optimalizaci algoritmem Min/Mid/Max – Kombinace algoritmů

Použitý algoritmus	Experiment	Evaluations	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
All Combinations	1	172800	1,388	11:27:34	88

Tabulka 48 - Výsledné hodnoty po první optimalizaci algoritmem All Combinations – Kombinace algoritmů

Algoritmy Min/Mid/Max a All Combinations byla nalezena maximální dosažená minimální poměrná rezerva s hodnotou 1,388. Vložením délek zelených do simulačního modelu bylo zjištěno, že délky cyklů jsou rozdílné. Zatímco algoritmus Min/Mid/Max nabízí délku 92s, což je hodnota větší než maximálně stanovená, algoritmus All Combinations nabízí délku 88s, kterou lze považovat za optimální nalezené řešení.

Srovnání výsledných hodnot minimálních poměrných rezerv stanovených simulačním a matematickým modelem při totožné délce cyklu, je zobrazeno v tabulce 49.

	Simulační model			Matematický model		
Hodnota minimální poměrné rezervy	1,388			1,388		
	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]	Začátek zelené [s]	Konec zelené [s]	Délka zelené [s]
VA1	20	28	8	23	64	41
VA2	19	43	24	22	46	24
VA3	17	39	22	20	46	26
VB1	0	23	23	3	48	45
VB2	0	15	15	3	18	15
VB3	0	5	5	2	12	10
VC1	66	85	19	69	88	19
VC2	63	71	8	67	86	19
VD1	47	52	5	72	88	16
VD2	47	60	13	50	63	13
VD3	45	54	10	50	63	13
Délka cyklu [s]	88			88		

Tabulka 49 - Srovnání výsledných hodnot získaných simulačním a matematickým modelem

6.3 Srovnání použitých algoritmů

Tabulka 50 zobrazuje hodnoty dosažených minimálních poměrných rezerv a k nim stanovené délky cyklů vytýčených pomocí simulačního modelu. Současně z tabulky vyplývá celková doba trvání optimalizace, což je součet všech dob trvání dílčích optimalizací daného algoritmu.

Je nezbytné konstatovat, že u všech použitých algoritmů byl využit stejný způsob stanovení horních a dolních mezí rozsahu řešení v závislosti na výsledných minimálních poměrných rezervách z předchozích částí algoritmu. Největší minimální poměrná rezerva byla stanovena algoritmem Adaptive Thermostatistical SA a zvolenou kombinací. Rozdíl mezi těmito metodami je v celkovém čase trvání optimalizace a ve zhodnocení výsledných hodnot. Zatímco pomocí algoritmu Adaptive Thermostatistical SA bylo nalezeno řešení po deseti minutách, zvolená kombinace algoritmů ho dosáhla po dvanácti hodinách. Současně je nutno uvést, že by doba trvání optimalizace u kombinace algoritmů mohla být kratší při dalším zúžení rozsahu. Z časového hlediska však bylo možné využít algoritmus All Combinations, který prohledá celý prostor a vždy nalezne optimální řešení.

Použitý algoritmus	Dosažená hodnota minimální poměrné rezervy	Délka Cyklu [s]	Celková doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]
Adapt. Thermo.	1,388	88	0:10:01
Random Solutions	1,379	89	1:25:54
Hill Climb	1,363	83	0:01:31
Min/Mid/Max – Nedokončen	1,444	136	19:17:58
Kombinace algoritmů	1,388	88	12:02:05

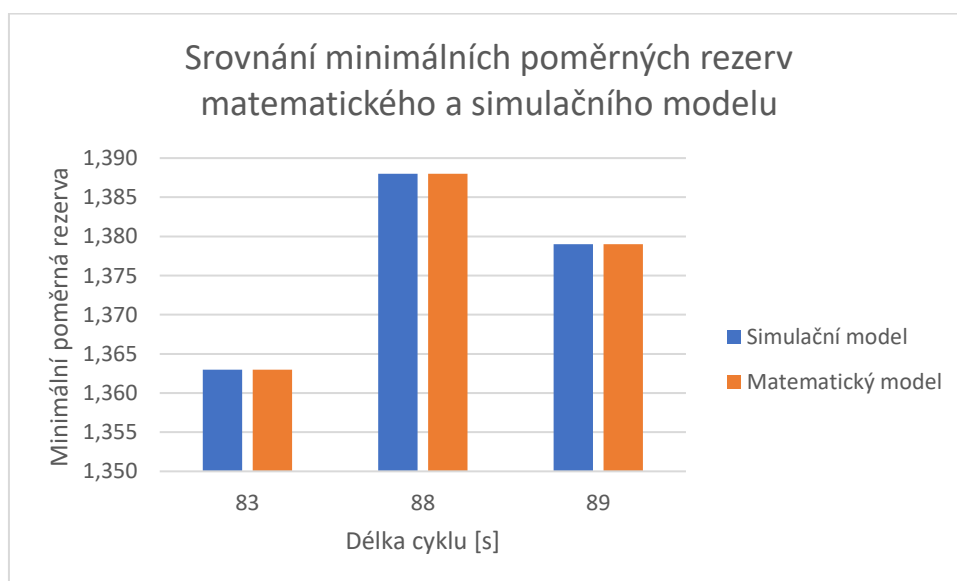
Tabulka 50 - Parametry všech celkových optimalizací

K určení a stvrzení, zda výsledné hodnoty jsou globálním nebo lokálním optimálním řešením, byly z matematického modelu zjištěny a zapsány do tabulky 51 minimální poměrné rezervy pro délky cyklů od 80s do 90s. Z ní vyplývá, že $v < 0; 90 >$ je hodnota 1,388 globálním maximem. Z komparace těchto hodnot s hodnotami získanými optimalizací, je zřejmé, že při použití jen jediného algoritmu během optimalizace bylo tohoto maxima dosaženo pouze algoritmem Adaptive Thermostatistical SA. V případě algoritmu Hill Climb bylo dosaženo lokálního extrému a hodnota zjištěná pomocí algoritmu Random Solutions nespádala ani do jedné z uvedených kategorií.

Délka cyklu [s]	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
Minimální poměrná rezerva	1,330	1,333	1,333	1,363	1,353	1,348	1,346	1,360	1,388	1,379	1,368

Tabulka 51 - Hodnoty minimálních poměrných rezerv získaných matematickým modelem

V obrázku 31 je zobrazeno srovnání výsledných minimálních poměrných rezerv matematického a simulačního modelu.



Obrázek 31 - Srovnání výsledných minimálních poměrných rezerv získaných simulačním a matematickým modelem

Při optimalizaci algoritmem Hill Climb bylo prokázáno tvrzení uvedené v definici, že při jeho použití dochází k uvíznutí v lokálním extrému. Není tedy nutné provádět více experimentů, jak citováno v této práci. Další teze, kterou lze osvědčit, se týká algoritmu Random Solutions. Jeho použitím v kombinaci algoritmů dokázal nejefektivněji zúžit rozsah řešení, a to řádově z 10^{17} na 10^5 možností.

6.4 Dodatek práce

Tato pasáž práce, která je provedena již nad rámec zadání práce, je zaměřena na testování zjištěných informací získaných předchozími provedenými experimenty.

Vstupní údaje

Vstupní údaje použité k optimalizaci jsou totožné s předchozí částí, avšak jako optimalizační kritérium zde bylo použito maximální průměrné zdržení ve frontě, které se minimalizuje. Oproti minimální poměrné rezervě se u tohoto kritéria nestanovuje maximální délka cyklu, jež chceme dosáhnout. Zúžení rozsahu řešení v tomto případě bylo realizováno na základě výsledných délek zelených z předcházejících optimalizací.

Použité optimalizační kritérium zajišťuje, že dojde k minimalizaci maximální hodnoty *Prumer_zdrzeni_ve_fronte*, lze jej napsat ve tvaru:

$$\text{Max_doba_zdrz} = \text{AMAX}(\text{Prumer_zdrzeni_ve_fronte}(i)) \rightarrow \min$$
$$i = \text{Počet dopravních proudů}$$

Nastavení nástroje Optimizer

V nastavení nástroje Optimizer byla oproti předchozím optimalizacím změněna Run Length (byla stanovena na 3600s) a Runs per Evaluation (byla upravena na hodnotu 3). Díky těmto změnám vzrostla Doba trvání optimalizace. Z časového hlediska proto byl omezen počet provedených experimentů v jedné optimalizaci.

Hlavním záměrem prvních čtyřech optimalizací bylo zúžení rozsahu řešení, a proto byl zde použit algoritmus Random Solutions. V tabulce 52 jsou zobrazeny pouze výsledné hodnoty po provedených optimalizacích.

Použitý algoritmus	Optimalizace	Maximum number of unique solutions to generate	Minimální dosažená hodnota maximálního průměrného zdržení ve frontě [s]	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Random Solutions	1	1500	52,432	01:07:15	108
Random Solutions	2	1500	41,91	01:06:55	70
Random Solutions	3	1500	38,196	01:07:02	68
Random Solutions	4	1500	29,667	01:06:29	53

Tabulka 52 - Výsledky optimalizací při použití algoritmu Random Solutions

Poslední čtvrtou optimalizací vykonanou algoritmem Random Solutions, bylo zjištěno maximální průměrné zdržení ve frontě, které je rovno hodnotě 29,667s. Vzhledem ke strojovým časům nebylo v tuto chvíli stále možné použít algoritmus All Combinations, tudíž v dalším postupu byl využit algoritmus Adaptive Thermostatistical SA. Pomocí něj byly provedeny tři optimalizace a každá z nich se skládala ze tří experimentů. Výsledné zjištěné hodnoty jsou zobrazeny v tabulkách 53 až 55. Před začátkem každé z těchto optimalizací došlo k zúžení rozsahu na základě předchozích výsledků.

Výsledky první optimalizace – Adaptive Thermostatistical SA

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum evaluations	Maximum moves without improvements	Minimální dosažená hodnota maximálního průměrného zdržení ve frontě [s]	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Adapt. Ther.	1	500	100	35,468	00:06:57	83
Adapt. Ther.	2	1000	200	33,753	00:15:29	59
Adapt. Ther.	3	1500	300	34,64	00:22:43	56

Tabulka 53 - Výsledné hodnoty po první optimalizaci algoritmem Adaptive Thermostatistical SA

Výsledky druhé optimalizace – Adaptive Thermostatistical SA

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum evaluations	Maximum moves without improvements	Minimální dosažená hodnota maximálního průměrného zdržení ve frontě [s]	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Adapt. Ther.	1	500	100	31,832	00:04:43	54
Adapt. Ther.	2	1000	200	31,832	00:08:34	54
Adapt. Ther.	3	1500	300	31,832	00:12:11	54

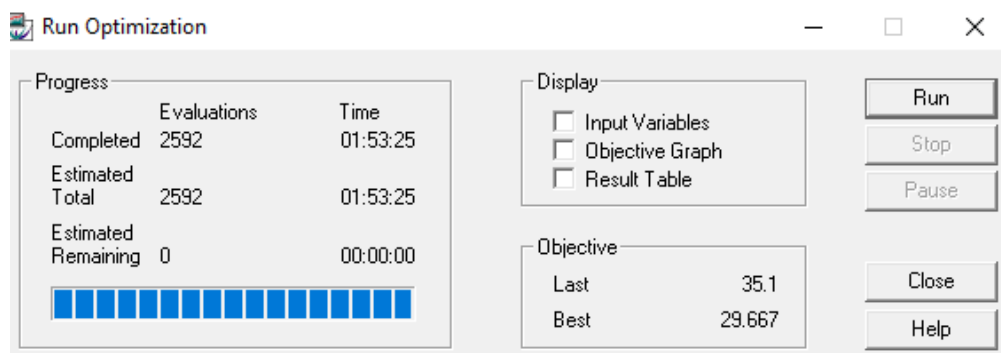
Tabulka 54 - Výsledné hodnoty po druhé optimalizaci algoritmem Adaptive Thermostatistical SA

Výsledky třetí optimalizace – Adaptive Thermostatistical SA

Použitý algoritmus	Experiment	Maximum evaluations	Maximum moves without improvements	Minimální dosažená hodnota maximálního průměrného zdržení ve frontě [s]	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
Adapt. Ther.	1	500	100	29,667	00:07:44	53
Adapt. Ther.	2	1000	200	31,832	00:10:05	54
Adapt. Ther.	3	1500	300	31,832	00:15:33	54

Tabulka 55 - Výsledné hodnoty po třetí optimalizaci algoritmem Adaptive Thermostatistical SA

Výsledné hodnoty dokazují, že minimální hodnota průměrného zdržení ve frontě je 29,667s. Nebylo však možné potvrdit, zda se jedná o optimální řešení. Proto bylo provedeno zúžení a následně byl použit algoritmus All Combinations. Na obrázku 32 jsou zobrazeny parametry optimalizace s výsledným maximální průměrným zdržení ve frontě. Tyto hodnoty jsou společně s vypočtenou délkou cyklu pomocí simulačního modelu zapsány do tabulky 56.



Obrázek 32 - Parametry získané optimalizací algoritmem All Combinations

Použitý algoritmus	Experiment	Evaluations	Minimální dosažená hodnota maximálního průměrného zdržení ve frontě [s]	Doba trvání optimalizace [hh:mm:ss]	Délka cyklu [s]
All Combinations	1	2592	29,667	01:53:25	53

Tabulka 56 - Výsledné hodnoty po optimalizaci algoritmem All Combinations

Za optimální řešení dané problematiky při zadaných podmínkách lze z výsledků optimalizace považovat hodnotu 29,667s. Simulačním modelem byla následně určena délka cyklu 53s.

Tabulka 57 uvádí srovnání průměrných zdržení ve frontách pro délky cyklů 53s, 60s a 88s (výsledné optimální řešení z předešlé kapitoly). Hodnoty byly stanoveny pro simulární čas 3600s (odpovídá jedné hodině). Průměrné zdržení ve frontě pro délku cyklu 60s bylo stanoveno na základě délek zelených určených matematickým modelem a pro délku cyklu 88s pomocí optimalizace.

Délka cyklu [s]		53	60	88
		Průměrné zdržení ve frontě t_w [s]	Průměrné zdržení ve frontě t_w [s]	Průměrné zdržení ve frontě t_w [s]
Řadící pruhy	VA1	18.91	7,72	42.23
	VA2	23.33	24,87	29.56
	VA3	16.30	23,98	29,63
	VB1	28.34	9,12	31,63
	VB2	27.04	37,40	37,37
	VB3	21.71	27,79	41,65
	VC1	26.59	25,27	32,27
	VC2	20.23	19,88	41,65
	VD1	22.67	16,63	39,64
	VD2	28.77	31,11	36,15
	VD3	22.03	27,99	43,34
Minimální poměrná rezerva		1,072	1,2	1,388

Tabulka 57 - Srovnání průměrných zdržení ve frontách pro délky cyklů 53 s, 60 s a 88 s

Z výše uvedené tabulky je patrné, že pro délku cyklu 53s je maximální hodnota zdržení ve frontě 28,77s, což je rozdílná hodnota oproti výslednému optimálnímu řešení dle tabulky 56. Odchylka je způsobena nastavením Runs per Evaluation v nástroji Optimizer, který určuje kolik běhů se za jedno hodnocení uskuteční, přičemž každý běh má trochu odlišné vstupní hodnoty (příjezd vozidel do fronty se řídí exponenciálním rozdělením). Při simulaci toto nelze nastavit.

Z tabulky je zřejmé, že nejnižšího maximálního zdržení ve frontě bylo dosaženo při délce cyklu 53s. Signální plán je zobrazen v příloze C a výsledný simulační model s hodnotami po 3600s v příloze D.

7 Závěr

Diplomová práce se zabývala testováním algoritmů, kterými disponuje optimalizační nástroj Optimizer. Modelem k provedení optimalizace byla světelně řízená, průsečná křižovatka, jejíž parametry byly popsány ve druhé kapitole s názvem vstupní údaje. V průběhu optimalizace byly výsledné dílčí hodnoty komparovány s výsledky matematického modelu, a právě třetí kapitola je zaměřena na jeho konstrukci. Matematický model křižovatky byl vytvořen v programu Xpress – IVE za použití dekompozičního přístupu, podle kterého se optimální délky zelených stanovují ve třech krocích. Prvním krokem bylo aplikací grafu bezkoliznosti zjistit minimální počet fází. Poté byl pomocí rozhodujících mezipřechů určen optimální sled fází a posledním bodem bylo samotné stanovení optimálních délek zelených. Aby bylo možno oba modely srovnávat, byla u nich zvolena účelová funkce minimální poměrná rezerva, která byla při optimalizaci maximalizována.

Čtvrtá kapitola byla věnována zhotovení simulačního modelu světelně řízené křižovatky v programu Witness. Zobrazuje nastavení všech použitých prvků společně s počátečními akcemi. V závěru kapitoly byla provedena verifikace matematického a simulačního modelu.

V úvodu páté kapitoly bylo popsáno nastavení optimalizačního nástroje Optimizer, v němž byly stanoveny hodnoty proměnných. Jednalo se o délky zelených s rozsahy od 5s do 40s, jelikož byl celý simulační model sestaven v jejich závislosti. Současně byla vytyčena maximální přípustná hodnota délky cyklu. Charakteristika všech algoritmů nabízených optimalizačním nástrojem Optimizer je navazujícím elementem popisu nastavení. Bylo zjištěno, že algoritmus Six Sigma nelze pro optimalizaci použít, a vzhledem k počátečnímu rozsahu bylo využití algoritmu All Combinations rovněž omezené.

Navazující testování bylo rozděleno do pěti částí podle použitých algoritmů. První čtyři části byly fixovány na jeden zvolený algoritmus, který se v průběhu optimalizace nezměnil. V páté části byla zvolena kombinace algoritmů, přičemž podmínkou k jejich použití bylo co nejefektivnější zúžení rozsahu. Jestliže byla doba trvání optimalizace přijatelná, byl použit algoritmus All Combinations.

Ověřováním bylo zjištěno, že algoritmus Adaptive Thermostatistical SA a zvolená kombinace algoritmů našly nejlepší optimální řešení, jímž se stala maximální minimální poměrná rezerva s hodnotou 1,388 a délkou cyklu 88s. Také bylo potvrzeno, že použitím algoritmu Hill Climb dochází často k uvíznutí v lokálním extrému, což vyplývá ze srovnání výsledné hodnoty nalezené tímto algoritmem (1,363) s minimálními poměrnými rezervami

stanovenými matematickým modelem. V okolí této hodnoty se nacházely pouze nižší minimální poměrné rezervy, avšak nejednalo se o globální maximum. Teze, že algoritmus Random Solutions se používá k zúžení rozsahu řešení, byla testováním potvrzena. Nalezené řešení daného algoritmu nebylo globálním ani lokálním maximem, avšak u kombinace algoritmů dokázal nejefektivněji zúžit rozsah. Z tohoto důvodu byl využit v jejích prvních čtyřech optimalizacích.

Dodatek práce popisuje nalezení optimálního řešení řízení zadané křižovatky, a to za použití rozdílného optimalizačního kritéria, než tomu bylo v předchozích zkouškách, avšak s využitím stejných vstupních údajů. Tímto kritériem bylo maximální průměrné zdržení ve frontě. Aplikovaným postupem byla kombinace algoritmů. V první části byl použit algoritmus Random Solutions. Po dostatečném zúžení rozsahu byl využit algoritmus Adaptive Thermostatistical SA, čímž došlo k dalším úpravám. Poté byl použit algoritmus All Combinations, který zajistil nalezení nejlepšího optimálního řešení. Výslednou minimální hodnotou maximálního průměrného zdržení ve frontě bylo 29,18s s délkou cyklu 53s a minimální poměrnou rezervou 1,072.

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil svůj dík panu doc. Ing. Michalovi Dordovi, Ph.D., za odborné vedení, vstřícnost, ochotu a připomínky při tvorbě této práce. Velice si vážím jeho pečlivosti, s jakou k vedení přistoupil.

Seznam použité literatury

- [1] DORDA, Michal. *Úvod do dopravního inženýrství*. [online]. [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~dor028/DI_1.pdf
- [2] *Dopravní inženýrství I. – křižovatky na pozemních komunikacích*. [online]. [cit. 2019-02-20]. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/11441983/>
- [3] RADIMSKÝ, Michal. *Projektování pozemních komunikací*. [online]. ©2007 [cit. 2019-02-21]. Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/CM01-Projektování%20pozemních%20komunikací/M07-Křižovatky%20úrovňové.pdf>
- [4] EDIP s.r.o. *Technické podmínky TP 81 – Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu*. [online]. 2015. [cit. 2019-01-18]. 174 s. Dostupné z: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_81.pdf
- [5] DORDA, Michal. *Návrh signálního plánu pro světelně řízenou křižovatku*. [online]. [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~dor028/DI_6.pdf
- [6] Situační schéma poskytl Magistrát města Opavy
- [7] KREJČÍ, Jan. Perner's Contacts. *Zkušenosti s navrhováním signálních plánů křižovatek metodami lineárního programování v podmínkách složitých křižovatek*. 2011, 4, 168-178. [online]. [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: http://pernerscontacts.upce.cz/23_2011/Krejci.pdf
- [8] DORDA, Michal. *I. část: Základy teorie grafů* [online]. [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~dor028/Teorie_grafu.pdf
- [9] EDIP s.r.o. *Technické podmínky 188 – Posuzování kapacity křižovatek a úseků pozemních komunikací*. [online]. 2018. [cit. 2019-02-20] 152 s. Dostupné z: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_188_2018.pdf
- [10] LANNER. WITNESS Horizon. [online]. [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <https://www.lanner.com/en-gb/technology/witness-simulation-software.html>
- [11] MÝDLO, Lukáš. *Simulace světelně řízené křižovatky*. Ostrava, 2011. Bakalářská práce. Technická univerzita Ostrava. Institut dopravy. Vedoucí práce Michal DORDA.
- [12] Manuály simulačního programu Witness

- [13] DORDA, Michal. Perner's Contacts. Studie využití simulačního software Witness při návrhu signálního plánu světelně řízené křižovatky. 2010, 3, 35-43. [online]. [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: http://pernerscontacts.upce.cz/19_2010/Dorda.pdf
- [14] VAŽAN, Pavel, PAULIČEK, Róbert. Hodnotenie algoritmov simulačnej optimalizácie vo Witness. Slovensko: Slovenská technická univerzita v Trnave, Materiálovotechnologická fakulta, Ústav aplikovanej informatiky a automatizácie.
- [15] Metody MCMC (STP139). [online]. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/a1ffj/4792333/mcmc.pdf>

Seznam příloh

Příloha A – Signální plán pro délku cyklu 60s

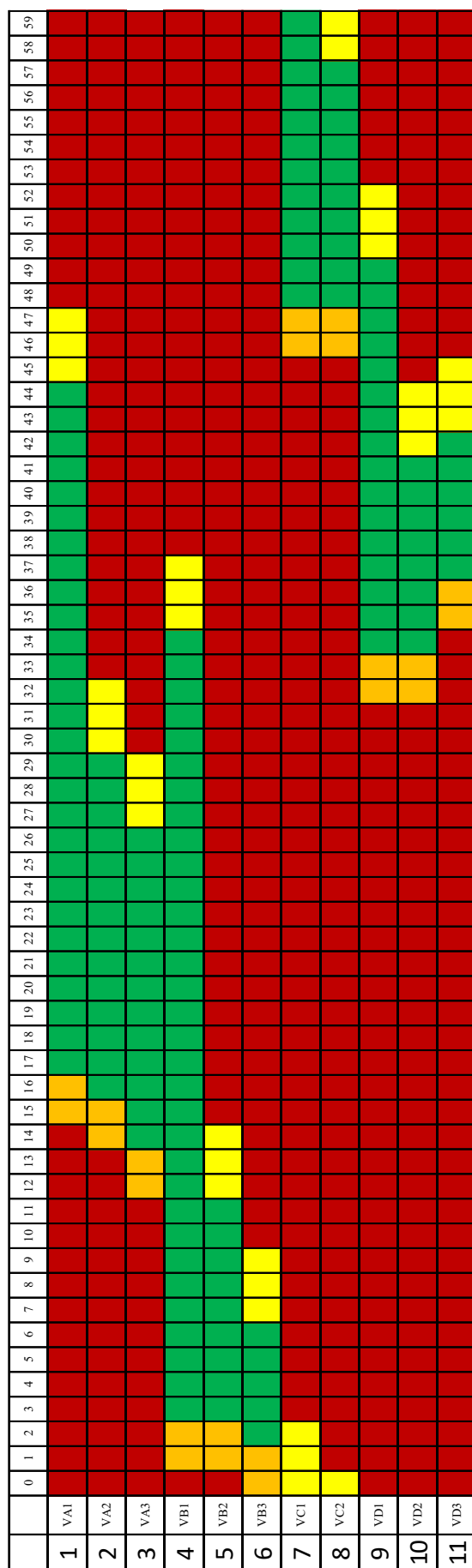
Příloha B – Simulační model pro délku cyklu 60s

Příloha C – Signální plán pro délku cyklu 53s

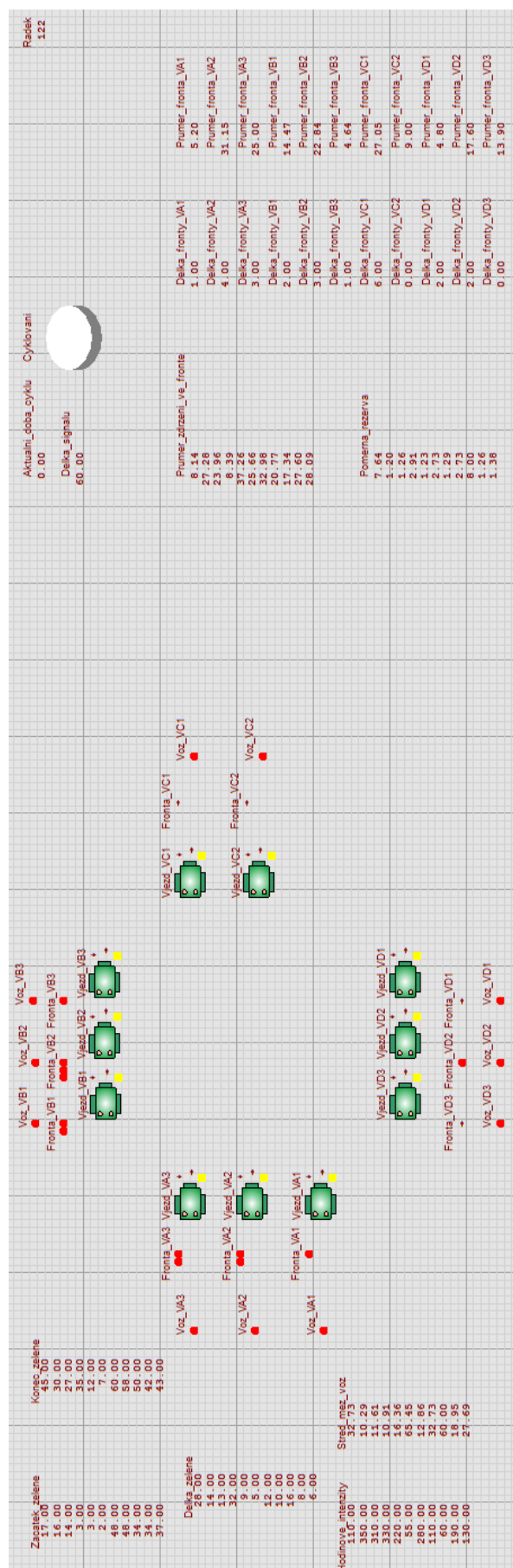
Příloha D – Simulační model pro délku cyklu 53s

Příloha E – Simulační model, výsledky experimentů – přiloženo na CD

Příloha A – Signální plán pro délku cyklu 60s



Příloha B – Simulační model pro délku cyklu 60s



Příloha C – Signální plán pro délku cyklu 53s

Příloha D – Simulační model pro délku cyklu 53s

